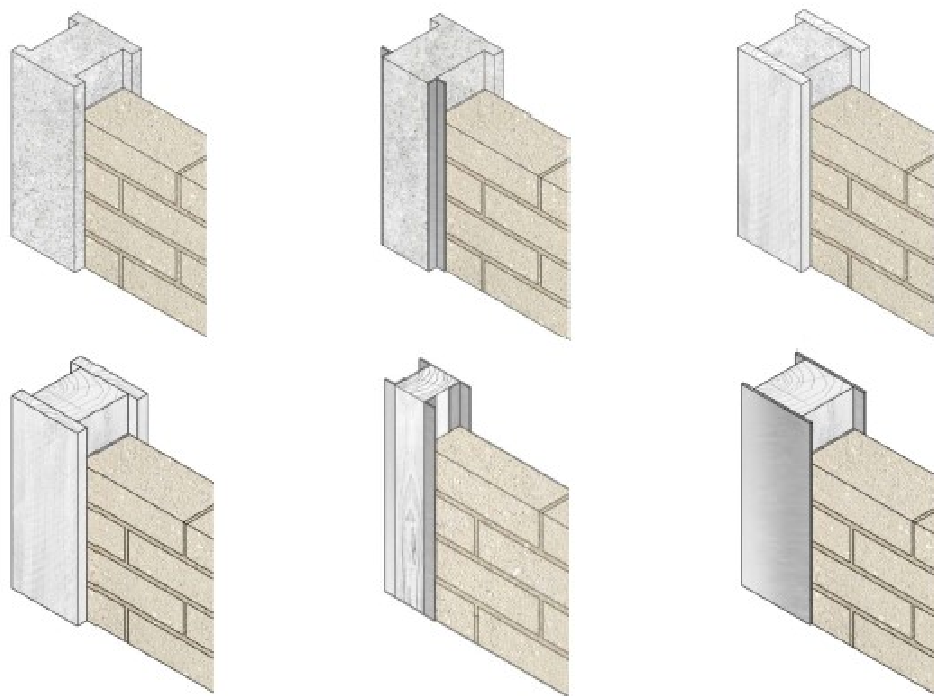
CSTB
le futur en construction

APPRECIATION TECHNIQUE D'EXPERIMENTATION

Numéro de référence CSTB : 2990_V1

ATEx de cas a

Validité du 01/02/2022 au 29/02/2024



L'Appréciation Technique d'expérimentation (ATEx) est une simple opinion technique à dire d'experts, formulée en l'état des connaissances, sur la base d'un dossier technique produit par le demandeur. *(extrait de l'art. 24)*

A LA DEMANDE DE :

SCIC Cycle Terre
2 bis rue Paul Langevin 93270 Sevran

Appréciation Technique d'Expérimentation n° 2990_V1

Note Liminaire : Cette Appréciation porte essentiellement sur le procédé de murs non porteurs en maçonnerie de Briques de Terre Comprimée montés au mortier, utilisés en remplissage d'une ossature porteuse en bois ou en béton.

Selon l'avis du Comité d'Experts en date du 01 février 2022, le demandeur ayant été entendu, la demande d'ATEx ci-dessous définie :

- demandeur : SCIC Cycle Terre
- technique objet de l'expérimentation : Réalisation de murs de remplissage non porteurs maçonnées à base de briques de terre compressée stabilisée ou non stabilisée en face intérieure de façades de bâtiments à ossature porteuse en bois ou en béton. La maçonnerie en BTC est soit support d'isolation thermique par l'extérieur (ITE) sous bardage ventilé de type XIII ou XIV au sens de la norme NF DTU 20.1, soit montée en doublage intérieur de façade. La jonction des BTC avec l'ossature porteuse est réalisée soit avec des liaisons continues formant une section en U, soit par des attaches métalliques.

Cette technique est définie dans le dossier enregistré au CSTB sous le numéro ATEx 2990_V1 et résumé dans la fiche sommaire d'identification ci-annexée,

donne lieu à une :

APPRECIATION TECHNIQUE FAVORABLE A L'EXPERIMENTATION

*Remarque importante : Le caractère favorable de cette appréciation ne vaut que pour une durée limitée au **29/02/2024**, et est subordonné à la mise en application de l'ensemble des recommandations formulées aux §4.*

Cette Appréciation, QUI N'A PAS VALEUR D'AVIS TECHNIQUE au sens de l'Arrêté du 21 mars 2012, découle des considérations suivantes :

1°) Sécurité

1.1 – Stabilité des ouvrages

La stabilité propre de la paroi en remplissage maçonné de Briques de Terre Comprimée peut être normalement assurée. Elle ne participe pas à la stabilité d'ensemble du bâtiment qui incombe à la structure porteuse en béton armé ou en ossature bois.

Les justifications expérimentales de la résistance en flexion f_{xk1} et f_{xk2} des maçonneries ont été réalisées par essais, les valeurs sont données au chapitre 4.2 du cahier des charges et la méthode de calcul devra respecter la norme NF DTU 20.1.

Dans le cas, où la liaison mur-ossature est assurée par attaches métalliques, le dimensionnement des attaches métalliques doit être mené sur la base des rapports d'essais fourni au cahier des charges, en utilisant un coefficient partiel matériau γ_m égal à 2,7 au sens de l'Annexe Nationale de la norme NF EN 1996-1-1. À défaut de justification par essai, les autres références d'attaches doivent faire l'objet d'essais et être conformes à la norme NF EN 845-1, à la norme NF EN 846-5 et aux prescriptions du cahier des charges.

Compte tenu des éléments de justification fournis dans le cahier des charges, et sous condition de respecter les limitations indiquées dans la présente Appréciation, la stabilité des murs de remplissage peut être assurée.

1.2 – Sécurité des intervenants

De ce point de vue, la mise en œuvre du procédé de murs de remplissage est assez proche des procédés traditionnels de murs en petits éléments. Par conséquent, les mesures de sécurité habituelles aux chantiers des murs de remplissage maçonnées permettent d'assurer la sécurité des intervenants.

1.3 – Sécurité en cas d'incendie

Compte tenu de la nature incombustible des matériaux constitutifs des Briques de Terre Comprimée et du mortier de joints, le procédé ne pose pas de problème particulier du point de vue de leur réaction au feu.

En matière de résistance au feu, le procédé permet de satisfaire à la réglementation incendie dans la limite des domaines de validité des Procès-Verbaux de classement établis par le laboratoire, rappelées au paragraphe 1.2.2 du cahier des charges.

2°) Faisabilité

2.1 – Production

La fabrication est réalisée dans l'atelier situé à l'adresse du demandeur. Cet atelier est spécialisé dans la fabrication des produits à base de terre objets de la présente ATEx. Des fabrications expérimentales ont été réalisées afin de fournir la matière première aux essais réalisés. Elles démontrent la faisabilité de la fabrication.

Le processus de fabrication allant de la sélection des terres jusqu'à la mise sur le marché est visé par un plan d'assurance qualité. Les valeurs des propriétés indiquées dans le cahier des charges sont à considérer comme des minima à atteindre sauf indication contraire.

2.2 – Mise en œuvre :

La mise en œuvre ne présente pas de difficulté majeure par rapport à un procédé de murs de remplissage maçonné traditionnel. Il convient cependant que les ouvriers soient correctement formés avant d'entreprendre la mise en œuvre du procédé afin de bien appréhender les particularités décrites dans le cahier des charges.

Une attention particulière doit être portée au rythme de montage particulier des murs de remplissage qui ne doit pas dépasser 10 fois l'épaisseur du mur (soit 0,95 m et 1,50 m), qui est à considérer dans la planification globale de l'opération.

La mise en œuvre de bardages ventilés de type XIII ou XIV au sens de la norme NF DTU 20.1 compatibles avec le procédé de Briques de Terre Comprimée devra répondre aux dispositions relevant d'un Avis Technique ou relevant d'une norme NF DTU ou d'un Cahier du CSTB. Toutefois, l'ancrage des bardages ventilés sur les murs de remplissage de Briques de Terre Comprimée n'est pas autorisé. Une ossature intermédiaire correctement dimensionnée peut être nécessaire pour permettre de liaisonner le bardage directement à la structure porteuse du bâtiment. Il convient de prendre en compte l'encombrement de l'ossature intermédiaire dans la détermination de l'épaisseur globale du complexe de façade

2.3 – Assistance technique

Le demandeur de l'ATEx assure une assistance technique aux utilisateurs du procédé.

3°) Risques de désordres

Les risques de désordres liés à l'utilisation de terre crue sont maitrisés. Ils sont principalement reliés au comportement à l'humidité de la terre, qu'elle soit stabilisée ou non, susceptible d'altérer ses performances mécaniques ainsi que la durabilité des parois. Le cahier des charges propose des dispositions permettant de gérer ces risques notamment :

- Une assise de mortier en pied de 2 cm minimum dans tous les types de pièces ;
- L'utilisation de brique de terre compressée de type Rc4 pour les pièces humides en local (EB) ;
- L'utilisation de brique de terre compressée stabilisée pour les pièces humides en local (EB+P).

4°) Recommandations

Il est recommandé de :

- Compléter le plan d'assurance qualité de fabrication en y intégrant toutes les valeurs cibles et les tolérances (essais de type initiaux et essais de suivi). Les valeurs du cahier des charges ci-après sont à considérer comme des minima ;
- De respecter les exigences du cahier des charges, lorsque le procédé est utilisé dans des lieux où le maitre d'ouvrage pense qu'une sollicitation importante à l'abrasion est à prévoir ;
- En phase provisoire, compléter le cahier des charges par un paragraphe décrivant les dispositions à prendre par les entreprises de pose pour éviter le risque de basculement des ouvrages sous l'effet de sollicitations dues au vent. En outre, installer les dispositifs de protection collectives et fixer les garde-corps sans tenir compte de la présence des ouvrages en BTC ;
- Les seuls bardages pouvant être mis en œuvre avec le présent procédé sont les bardages traditionnels ou ceux relevant d'un Avis Technique (DTA ou Cahier du CSTB) ;
- Attirer l'attention de la Maîtrise d'Ouvrage sur les conditions d'entretien des parois en BTC apparentes qui ne doivent pas être nettoyées par utilisation d'eau sous pression.

EN CONCLUSION

En conclusion et sous réserve de la mise en application des recommandations ci-dessus, le Comité d'Experts considère que :

- La sécurité est assurée,
- La faisabilité est probable,
- Les risques de désordres sont limités.

Champs sur Marne,
Le Président du Comité d'Experts,



Ménad CHENAF

Le présent document comporte 72 pages dont deux annexes ; il ne peut en être fait état qu'in extenso.

Appréciation Technique d'Expérimentation n° 2990_V1

ANNEXE 1

FICHE SOMMAIRE D'IDENTIFICATION (1)

Demandeur : SCIC Cycle Terre
2 bis rue Paul Langevin 93270 Sevran

Définition de la technique objet de l'expérimentation :

Procédé de murs de remplissage non porteurs maçonnées à base de briques de terre compressée stabilisée ou non stabilisée en face intérieure de façades de bâtiments à ossature porteuse en bois ou en béton. La maçonnerie en BTC est soit support d'isolation thermique par l'extérieur (ITE) sous bardage ventilé de type XIII ou XIV au sens de la norme NF DTU 20.1, soit montée en doublage intérieur de façade. La jonction des BTC avec l'ossature porteuse est réalisée soit avec des liaisons continues formant une section en U, soit par des attaches métalliques.

Les constituants principaux sont les briques de terre compressée et le mortier de terre. Différents formats de briques existent permettant de réaliser des parois de 9,5, 15 et 22 cm.

Deux catégories de briques sont fabriquées :

- Les blocs non stabilisés (BTC) : ils sont composés d'un mélange de terre argileuse et de sable de 0/2 mm à 0/4 mm (environ 35% en masse), permettant une correction granulaire ;
- Les blocs stabilisés (BTCS) : un liant hydraulique (environ 5% de ciment, en masse) est ajouté à la terre pour améliorer les performances des BTC, notamment la résistance à l'humidité et à l'abrasion.

Les caractéristiques mécaniques de briques sont :

- Classe minimum de résistance selon XP P13-901 : BTC 20 ;
- Résistance minimum garantie à l'état sec (mesurée selon la NF EN 772-1) : 2 MPa ;
- Résistance minimum garantie à l'état sec (BTCS uniquement) : 5 MPa ;
- Masse volumique apparente (selon XP P13-901) : BTC : 1,9 (+2 / - 0,1 kg/dm³) BTCS : 1,8 (+1,9 /- 0,1 kg/dm³) ;
- Résistance à l'abrasion minimum selon XP P13-901 : BTC 20 = 0,5 g/cm², BTC 40 = 0,2 g/cm² et BTCS = 0,05 g/cm².

Le mortier est produit avec les mêmes terres que les briques mais avec une correction granulaire différente (environ 70% en masse). Les briques stabilisées sont utilisées avec un mortier bâtard M2.5.

Mise en œuvre :

La mise en œuvre diffère assez peu de celle des procédés traditionnels. Quelques points d'attention doivent cependant être portés à la connaissance des utilisateurs réalisant leur première opération. Outre les dispositions constructives spécifiques, le rythme de montage particulier des murs (entre 0,95 m et 1,5 m) est à considérer dans la planification globale de l'opération.

Domaine d'emploi visé :

Les ouvrages visés sont les bâtiments destinés aux logements, à recevoir du public (ERP) et aux immeubles de bureaux, pour des conditions normales d'utilisation. Les locaux humides peuvent être de type EA et EB+P. Les ouvrages nécessitant des dispositions parasismiques au sens de l'arrêté du 22 octobre 2010 modifié ne sont pas visés.

(1) La description complète de la technique est donnée dans le dossier déposé au CSTB par le demandeur et enregistré sous le numéro ATEx 2990_V1 et dans le cahier des charges de conception et de mise en œuvre technique (cf. annexe 2) que le fabricant est tenu de communiquer aux utilisateurs du procédé.

ANNEXE 2

CAHIER DES CHARGES DE CONCEPTION ET DE MISE EN OEUVRE

Ce document comporte XX pages.

Procédé de murs de remplissage en briques de terre

« Dossier technique établi par le demandeur »

Version tenant compte des remarques formulées par le comité d'Experts

Datée du 01 février 2022

A été enregistré au CSTB sous le n° d'ATEx 2990_V1.

Fin du rapport

Appréciation Technique d'Expérimentation de type A

REMPLISSAGE DE FAÇADE EN MAÇONNERIE DE BTC

DOSSIER TECHNIQUE LIÉ À L'ATEX DE TYPE A N°2990

VERSION DU 17 FEVRIER 2022

ÉQUIPE DE RÉDACTION
Eugénie CRÉTÉ, **AE&CC-ENSAG-UGA**
Arnaud MISSE, **CRAterre - Nama**
Mathilde CHAMODOT, **AE&CC-ENSAG-UGA, CRAterre**
Luis ARLEO, **AE&CC-ENSAG-UGA**
Thierry JOFFROY**, AE&CC-ENSAG-UGA**
Inès TOUZARD, **Nama**
Alix HUBERT, **CRAterre**
Bakonirina RAKOTOMAMONJY, **CRAterre**
Majid HAJMIRBABA, **CRAterre**

CONTRIBUTEURS
Patrick RIBET, **amàco**
Gabin WURTZ, **amàco**
Lionel ROUSOUX, **amàco**
Cécile PLUMIER, **Vessière**
Bernard SCHMITT, **Vessière**
Samuel TOCHON-DANGUY, **LASA**
Pierre BRIE, **LASA**

Ce projet est cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional à travers l'Initiative Actions Innovatrices Urbaines











MC

TABLE DES MATIÈRES

A. DESCRIPTION DU PROCÉDÉ 5
1. PRINCIPE ET DOMAINE D'EMPLOI 5
1.1. TYPE DE PAROIS 5
1.2. DOMAINES ET LIMITES D'EMPLOI 9
1.2.1. Types de bâtiments 9
1.2.2. Règlement sécurité incendie 9
1.2.3. Zonage sismique 9
1.2.4. Thermique 9
1.2.5. Températures et hygrométrie des locaux 9
1.2.6 Isolement acoustique 10
2. MATÉRIAUX 11
2.1. BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE CYCLE TERRE 11
2.1.1. Caractéristiques des BTC(S) 11
2.1.2. Formes et dimensions des BTC Cycle Terre 12
2.2. MORTIERS DE POSE POUR BTC CYCLE TERRE 12
2.2.1. Constituants à ajouter 12
2.2.2. Caractéristiques du mortier 13
2.3. ENDUIT 13
2.4. ATTACHES DE LIAISON 13
2.5. OSSATURE SECONDAIRE, ISOLANT THERMIQUE ET REVETEMENT EXTERIEUR 14
2.5.1. Cas A 14
2.5.2. Cas B 15
2.6. FINITIONS INTÉRIEURES 17
2.6.1. Fixateur, vernis ou peinture 17
2.6.2. Enduit 17
3. DESCRIPTION DE LA FABRICATION 18
3.1. VOLUMES DE PRODUCTION 18
3.2. PRÉPARATION DE LA TERRE 18
3.2.1. Préparation 18
3.2.2. Stockage des matières premières 19
3.3. PROCESSUS DE FABRICATION DES BTC 19
3.3.1. Dosage et malaxage des matières premières 19
3.3.2. Compression 19
3.3.3. Palettisation 19
3.3.4. Cure et séchage des matériaux produits 19

MC

3.3.5. Conditionnement et stockage 20
3.4. PROCESSUS DE FABRICATION DU MORTIER 20
3.4.1. Dosage et mélange des matières premières 20
3.4.2. Conditionnement et stockage 20
3.5. CONDITIONS DE TRANSPORT DES PRODUITS 21
3.6. CONTRÔLES 21
4. DIMENSIONNEMENT ET CONCEPTION 22
4.1. PRINCIPES DE CONCEPTION 22
4.2. DIMENSIONNEMENT 25
4.3. DÉTAILS TECHNIQUES 26
4.3.1. Calepinage - appareillage 26
4.3.2. Liaisons basses 27
4.3.3. Jonction haute 31
4.3.4. Jonction entre remplissage en BTC et raidisseur 33
4.3.5. Angles 35
4.3.6. Jonction avec des cloisons ou murs de refend 36
4.3.7. Jonction avec les ouvertures 38
4.3.8. Pièces humides 44
4.3.9. Doublage intérieur 46
4.3.10. Implantation des réseaux 46
4.3.11. Fixation de charges non structurelles 47
5. MISE EN ŒUVRE 48
5.1. PRÉPARATION DU CHANTIER ET CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE 48
5.1.1. Préparation du chantier 48
5.1.2. Conditions de mise en œuvre 49
5.2. PRÉPARATIONS POUR LA MAÇONNERIE BTC 49
5.2.1. Fixation des raidisseurs 49
5.2.2. Interfaces avec le sol, les raidisseurs, les murs, le plafond 49
5.2.3. Gâchage et utilisation des mortiers 49
5.3. POSE DES BTC 50
5.3.1. Démarrage de la maçonnerie 50
5.3.2. Pose des BTC en partie courante 50
5.3.3. Cadence de pose et limite d'élévation quotidienne 50
5.3.4. Mise en place des attaches 51
5.3.5. Coupe, taille, perçage 51
5.3.6. Jointoiement 51
5.3.7. Dernier rang de maçonnerie 51
5.3.8. Protection des ouvrages en phase provisoire (Cas A) 52
5.4. FINITION DE LA MAÇONNERIE 52
5.5. ENTRETIEN 53

MC

6. COMMERCIALISATION DU PROCÉDÉ 54
7. FORMATION DES ENTREPRISES 54
B. JUSTIFICATIONS TECHNIQUES 55
1. SATISFACTION AUX LOIS ET RÈGLEMENTS EN VIGUEUR 55
1.1. STABILITÉ ET RÉSISTANCE MÉCANIQUE 55
1.1.1. RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BTC(S) 55
1.1.2. RESISTANCE A LA COMPRESSION DU MORTIER 56
1.1.3. RESISTANCE A LA FLEXION DE LA MAÇONNERIE 56
1.1.4. RESISTANCE AU CISAILLEMENT DE LA MAÇONNERIE 57
1.1.5. JUSTIFICATION DU DIMENSIONNEMENT DE LA MAÇONNERIE 57
1.1.6. JUSTIFICATION DES ATTACHES DE LIAISON ENTRE MAÇONNERIE ET RAIDISSEURS 58
1.1.7. JUSTIFICATION DES ATTACHES DE FIXATION DE L'ISOLANT DANS LA MAÇONNERIE BTC 58
1.2. SÉCURITÉ EN CAS D'INCENDIE 59
1.2.1. Réaction au feu 59
1.2.2. Résistance au feu 59
1.3. ISOLEMENT ACOUSTIQUE 59
1.4. STABILITÉ PARASISMIQUE 61
2. APPRÉCIATION DE L'APTITUDE À L'EMPLOI 62
2.1. ESSAIS DE CHOCS 62
2.2. ESSAI DE FIXATIONS DE CHARGES LOURDES 63
2.3. MESURES DE RETRAIT ET DE TASSEMENT 64
2.4. JUSTIFICATION DE LA COMPATIBILITE DE DEFORMATIONS ENTRE OSSATURE ET BTC 65
2.5. ESSAIS D'ARRACHEMENT D'ENDUITS 65
2.6. JUSTIFICATIONS RELATIVEMENT A L'HUMIDITE RELATIVE DES LOCAUX 66

MC

A. DESCRIPTION DU PROCÉDÉ

1. PRINCIPE ET DOMAINE D'EMPLOI

1.1. TYPE DE PAROIS

Cette demande d'ATEx de type A porte sur la réalisation de murs non porteurs en maçonneries en blocs de terre comprimée (BTC) Cycle Terre en face intérieure de façades de bâtiments à ossature porteuse en bois ou en béton.

La maçonnerie en BTC est soit support d'isolation thermique par l'extérieur (ITE) sous bardage ventilé de type XIII ou XIV au sens du DTU 20.1 (cas A), soit montée en doublage intérieur de façade (cas B).

La paroi est composée de (de l'intérieur vers l'extérieur) :

Tableau 1 : Composition de parois visées dans l'ATEx

Cas A	Cas B		
Ossature porteuse bois ou béton	Ossature béton porteuse		Ossature bois porteuse
Maçonnerie de BTC et mortier Cycle Terre de **15 cm d'épaisseur minimum**	Maçonnerie de BTC et mortier Cycle Terre de **9,5 cm d'épaisseur minimum**	Maçonnerie de BTC et mortier Cycle Terre de **9,5 cm d'épaisseur minimum**	Maçonnerie de BTC et mortier Cycle Terre de **9,5 cm d'épaisseur minimum**
Enduit[1] sur une des deux faces de la maçonnerie	Lame d'air qui peut être partiellement comblée par un isolant	Lame d'air ventilée + pare-vapeur	Lame d'air ventilée + pare-vapeur
Isolation éventuelle	Mur support d'isolation en maçonnerie conventionnelle (conforme DTU 20.1) ou en voile béton (conforme DTU 22.1 ou 23.1)	Façade à ossature bois (conforme au DTU 31.4) support d'isolation	Mur type construction à ossature bois (conforme au DTU 31.2) ou façade à ossature bois (conforme au DTU 31.4) support d'isolation
Lame d'air ventilée et ossature secondaire fixée à l'ossature porteuse	Isolation éventuelle, avec lame d'air si nécessaire	Lame d'air ventilée et ossature secondaire éventuelle	Lame d'air ventilée et ossature secondaire éventuelle
Parement du bardage ventilé correspondant à un mur de type XIII ou XIV au sens du DTU 20.1	Parement compatible avec une mise en œuvre sur le mur support (de type bardage ouETICS)	Parement compatible avec une mise en œuvre sur un mur de façade conforme aux DTU 31.4 (de type bardage ouETICS)	Parement compatible avec une mise en œuvre sur un mur de façade conforme aux DTU 31.2 ou 31.4 (de type bardage ou ETICS)

L'attention des concepteurs est attirée sur les points de vigilance suivant :

[1] Dans le cas d'un bardage de type XIII, cet enduit est obligatoire et doit être appliqué sur la face extérieure de la maçonnerie. Dans le cas d'un bardage de type XIV, l'enduit est nécessaire uniquement si une étanchéité à l'air est souhaitée, et peut être appliqué soit sur la face intérieure soit sur la face extérieure de la maçonnerie BTC. Cf. A.2.3.

MC

- Dans le cas A, l'ossature secondaire support de bardage doit être fixée à l'ossature porteuse et non à la maçonnerie BTC. Le système de fixation proposée (décrit au paragraphe A.2.5.1) n'est pas conventionnel et sa compatibilité avec le parement du bardage ainsi que son dimensionnement[2] doivent être vérifiés au cas par cas. L'attention des entreprises devra être attirée sur ce point lors de la passation des marchés. Des exemples de bardage compatibles avec le cas A sont proposés en annexe.
- Dans le cas A, dans le cas d'une ossature bois porteuse, le système de liaison entre la maçonnerie et l'ossature a été défini de façon à limiter le risque de déformations des attaches liées au comportement hygrométrique différent des deux matériaux. Il est limité à des systèmes permettant un déplacement vertical sans endommagement des éventuelles attaches (attaches métalliques sur rail ou système linéaire avec profil du poteau, voir paragraphe A.4.3.4).
- Dans le cas A, dans le cas d'une ossature bois porteuse, le bois utilisé devra être de classe 3.

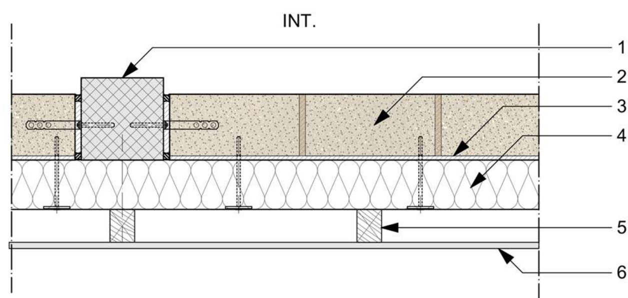


Fig. 1 : Cas A avec ITE et enduit sur face extérieure de la maçonnerie BTC

1. ***Poteau d'ossature béton armé ou bois***
2. ***Remplissage BTC***
3. ***Enduit sur BTC***
4. ***Isolation***
5. ***Structure secondaire du parement extérieur+ lame d'air ventilé***
6. ***Parement extérieur***

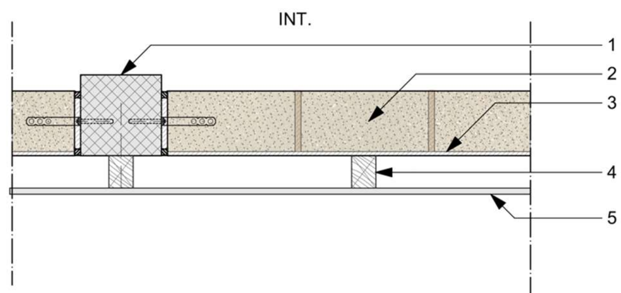


Fig. 2 : Cas A sans ITE

1. ***Poteau d'ossature béton armé ou bois***
2. ***Remplissage BTC***
3. ***Enduit chaux sur BTC***
4. ***Structure secondaire du parement extérieur+ lame d'air ventilé***
5. ***Parement extérieur***

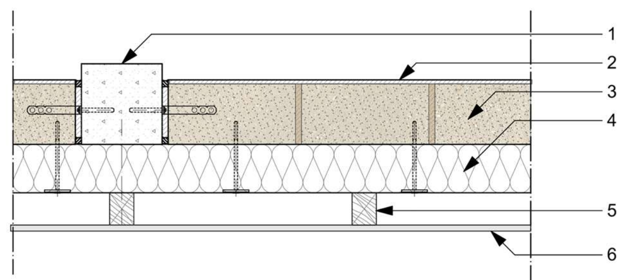


Fig. 3 : Cas A avec ITE et enduit sur face extérieure de la maçonnerie BTC

1. ***Poteau d'ossature béton armé ou bois***
2. ***Enduit intérieur sur BTC***
3. ***Remplissage BTC***
4. ***Isolation***
5. ***Structure secondaire du parement extérieur+ lame d'air ventilé***
6. ***Parement extérieur***

[2] En zone de vent 2 (Ile de France), une section de 6x8cm convient dans de nombreux cas pour une longueur de chevron de 3m sans fixation intermédiaire. Cette section doit toutefois être ré-évaluée par les BET structure de chaque opération en fonction des caractéristiques du parement.

MC

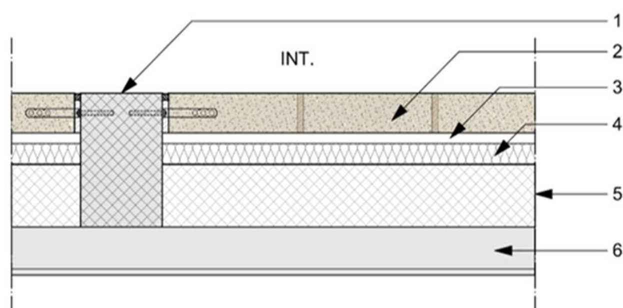


Fig. 4 : Cas B – Schéma de principe avec poteau d'ossature principale en maintien du parement

1. ***Poteau d'ossature béton armé ou bois***
2. ***Remplissage BTC***
3. ***Lame d'air ventilée ou non***
4. ***Isolation si nécessaire***
5. ***Mur de remplissage / d'enveloppe maçonnerie ou bois – support du parement extérieur***
6. ***Parement extérieur***

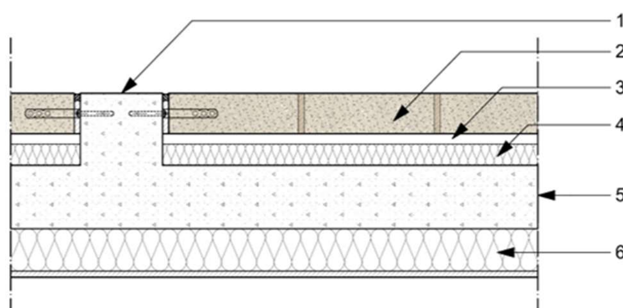


Fig. 5 : Cas B - Exemple avec ossature béton et ITE en panneaux enduits

1. ***Poteau d'ossature béton armé***
2. ***Remplissage BTC***
3. ***Lame d'air***
4. ***Isolation***
5. ***Mur béton armé***
6. ***ETICS : isolation + enduit adapté au support***

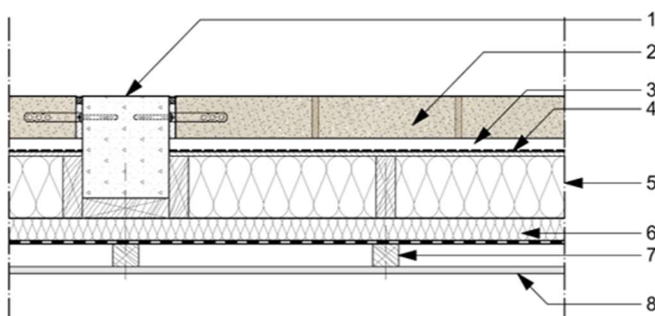


Fig. 6 : Cas B - Exemple avec ossature béton et Façade Ossature Bois

1. ***Poteau d'ossature béton armé***
2. ***Remplissage BTC***
3. ***Lame d'air***
4. ***Pare vapeur***
5. ***Façade en ossature bois (FOB)***
6. ***Complément d'isolation + pare pluie***
7. ***Structure secondaire support du parement + lame d'air ventilée***
8. ***Parement de finition adapté au support***

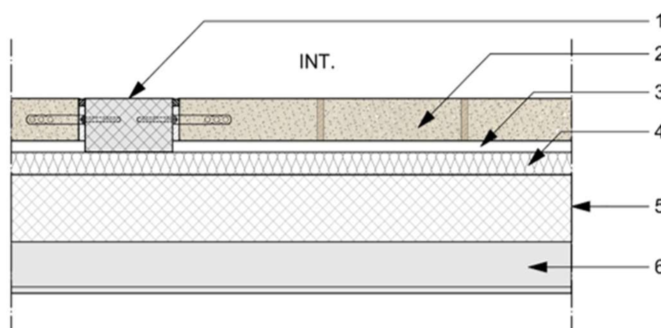


Fig. 7 : Cas B – Schéma de principe avec poteau d'ossature secondaire en maintien du parement

1. ***Poteau d'ossature béton armé ou bois dissociée du mur d'enveloppe***
2. ***Remplissage BTC***
3. ***Lame d'air ventilée ou non***
4. ***Isolation si nécessaire***
5. ***Mur d'enveloppe maçonnerie ou bois – support du parement extérieur***
6. ***Parement extérieur***

MC

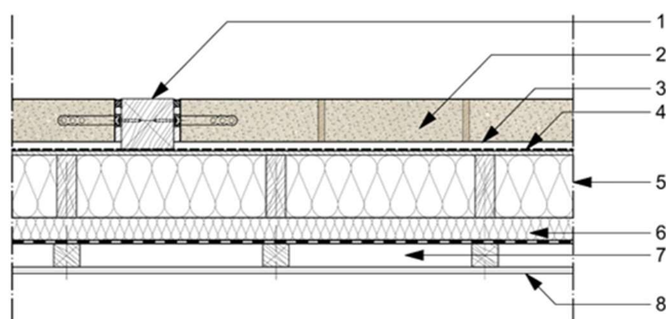


Fig. 8 : Cas B - Exemple avec ossature bois secondaire et Mur à Ossature Bois

1. ***Poteau secondaire d'ossature bois***
2. ***Remplissage BTC***
3. ***Lame d'air***
4. ***Pare vapeur***
5. ***Mur en ossature bois (MOB)***
6. ***Complément d'isolation + pare pluie***
7. ***Structure secondaire support du parement + lame d'air ventilée***
8. ***Parement de finition adapté au support***

La maçonnerie BTC est encadrée par des raidisseurs (intégrés à la structure principale du bâtiment ou non) dont l'espacement maximal dépend de l'épaisseur et de la hauteur de la maçonnerie, et dans le cas A, de son exposition au vent (en première approximation la hauteur du bâtiment).
Dans le cas A, cet espacement maximal peut être déterminé par les concepteurs en s'appuyant sur la méthode de dimensionnement décrite au § B.1.1.5, notamment dans le cas d'un recours à de la maçonnerie stabilisée, de résistance à la flexion plus élevée (cf. §B.1.1.3).

Les essais aux chocs réalisés et les mesures de résistance à la flexion de la maçonnerie non stabilisée disponibles à l'heure actuelle ont permis de déterminer les dimensions maximales suivantes (contacter Cycle Terre pour connaître les éventuelles mises à jour) :

Tableau 2 : Synthèses des dimensionnements de maçonnerie non stabilisée autorisés

CAS A :

	BTC ép 22cm								BTC ép 15cm	
	h = 3,2		h= 3		h= 2,6		h = 2,4		h = 2,2	h = 1,8
	H <10 m	H <28m	H <10 m	H <28m	H <10 m	H <28m	H <10 m	H <28m	H <10 m	H <28m
l (m)	2,9	2,1	3	2,2	3,1	2,3	3,3	2,4	2	2,3

Avec h la hauteur de maçonnerie, l la longueur de maçonnerie et H la hauteur du bâtiment

CAS B :

Longueur maximum de maçonnerie autorisée			
Epaisseur de maçonnerie :	Hauteur 260 cm	Hauteur 300 cm	Hauteur 400 cm
9,5 cm	350 cm	*Non autorisé*	*Non autorisé*
15 cm	430 cm	430 cm	*Non autorisé*
22 cm	612cm	612cm	612cm

La flèche de l'ossature porteuse étant limitée à 10mm (cf. A.4.1), une mise en œuvre de la maçonnerie sur des longueurs supérieures à 500cm implique une limitation des flèches supérieure à H/500.

Dans le cas de maçonnerie d'épaisseurs intermédiaires, les concepteurs pourront déterminer les distances maximales entre raidisseurs en appliquant la méthode de dimensionnement exposée au paragraphe B.1.1.5.

Les ouvrages d'ossature porteuse du bâtiment, l'isolant, l'ossature secondaire et le parement ne sont pas visés par cette ATEx.

L'ossature porteuse du bâtiment sera conforme aux Eurocodes 0 et 1, à l'Eurocode 2 (ossature porteuse béton) et à l'Eurocode 5 (ossature porteuse bois), y compris leurs annexes nationales.

Les revêtements extérieurs seront posés conformément à leur référentiel (DTU, Avis Techniques, ATEX ou Règles Professionnelles).

MC

1.2. DOMAINES ET LIMITES D'EMPLOI

1.2.1. TYPES DE BÂTIMENTS

Tous les types de constructions courantes sont visés : ERP, maisons individuelles, bâtiments de logements en collectif, bâtiments pour bureaux, constructions scolaires et tous types de bâtiments à usage commercial, industriel ou agricole.

Les ouvrages visés sont tous types d'immeubles de hauteur inférieure à 28 m. L'attention des concepteurs est attirée sur les flèches maximales de la structure porteuse compatibles avec le procédé objet de cette ATEx (cf. A.4.1) :

- limitation des flèches de la structure primaire à 1/500e de leurs portées, dans la limite de 10 mm ;
- limitations des déformations dans leurs plans des poteaux de l'ossature verticale en liaison directe avec la maçonnerie BTC limitées à H/300 à l'ELS, avec H la hauteur d'étage, dans la limite de 5mm, sauf liaison à la maçonnerie par prise en feuillure (cf. A.4.3.4) ou utilisation d'attaches de liaisons adaptées (avec manchon de glissement par exemple) ;
- limitations des déformations hors plans des poteaux de l'ossature verticale en liaison directe avec la maçonnerie BTC limitées à H/500 à l'ELS, avec H la hauteur d'étage.

Ces limites de déformations doivent en particulier être anticipées dans le cas de bâtiments à ossature bois porteuse.

1.2.2. RÈGLEMENT SÉCURITÉ INCENDIE

Lorsque la règlementation exige la prise en compte de dispositions vis-à-vis du risque de propagation du feu en façade, c'est-à-dire en particulier en bâtiment d'habitation 3ème et 4ème famille et certains ERP comportant plus de 2 niveaux (≥R+2), la performance du système de façade doit être démontrée par ailleurs (appréciation de laboratoire[3] ou conformité à un guide de préconisations disponible à date).

En janvier 2022, la maçonnerie BTC Cycle Terre dispose de 3 PV d'essai au feu garantissant :

- Un classement EI30 en maçonnerie d'épaisseur 9,5cm et de hauteur inférieure à 3m en ossature bois ;
- Un classement EI45 en maçonnerie d'épaisseur 9,5cm et de hauteur inférieure à 3m en ossature béton ;
- Un classement EI240 en maçonnerie d'épaisseur 15cm et de hauteur inférieure à 3m en ossature béton.

Contacter Cycle Terre pour connaître les détails de mise en œuvre et les éventuels PV supplémentaires obtenus par la suite.

1.2.3. ZONAGE SISMIQUE

L'utilisation du remplissage objet de cette ATEx est limitée aux programmes pour lesquels aucune vérification n'est requise selon l'article 3 de l'arrêté du 22 octobre 2010.

1.2.4. THERMIQUE

Toutes zones de neige et de gel, région de vents 1 et 2.

Le BTC n'est pas isolant, sa conductivité thermique est de l'ordre de 0,8 W(m.K)$^{-1}$. Placé à l'intérieur de l'enveloppe isolée, il apporte de l'inertie thermique au bâtiment, qui se traduit par un amortissement et un déphasage des variations de températures intérieures par rapport aux variations de températures extérieures, et améliore le confort hygrothermique, notamment via un lissage du taux d'humidité de l'air intérieur.

Selon l'épaisseur d'isolant et ses caractéristiques thermiques, le BET Thermique de chaque projet vérifiera la compatibilité de la façade avec la localisation de l'ouvrage et les performances attendues.

1.2.5. TEMPÉRATURES ET HYGROMÉTRIE DES LOCAUX

L'usage des remplissages décrits dans cette ATEx est permis dans :

---

[3] Dans le cas d'une ossature béton porteuse, d'une ossature secondaire métallique et d'un isolant A1, l'appréciation de laboratoire peut être obtenue sans réalisation d'essai supplémentaire. Dans les autres cas, si la performance du bardage n'est pas déjà démontrée par ailleurs, alors l'efficacité du système de façade devra s'appuyer sur un essai LEPIR (qui servira de base à une appréciation de laboratoire).

MC

- les locaux classés[4] EA (locaux secs ou faiblement humides) ou EB (locaux moyennement humides). Le parement maçonné est autorisé en local EB+P uniquement sur les parois non exposées à des projections d'eau régulières et sous réserve d'utiliser des BTCS et du mortier stabilisé (Cycle Terre ou M2,5 ou M5 de recette selon EC6) pour la réalisation de la maçonnerie. L'utilisation du procédé pour des locaux classés EB+ collectifs et EC n'est pas visée par la présente ATEx. La ventilation des locaux chauffés devra garantir que le taux d'humidité relative moyen journalier prévisible ne dépasse pas 80% pendant plus de sept jours d'affilée[5].
  - Dans le cas d'une ossature bois porteuse : Les locaux ponctuellement et temporairement rafraichis ou non en période chaude par un système d'appoint associé à la ventilation mécanique, dans le respect des conditions des normes NF DTU 31.2 et NF DTU 31.4 (différence de température intérieure / extérieure < 5 °C).

1.2.6 ISOLEMENT ACOUSTIQUE

Des R_w (C;Ctr) de 47 (-1 ; -4) dB et 50 (-1 ; -4) ont été estimés pour des maçonneries d'épaisseur respectives 15 et 22 cm, non enduite, et avec des jonctions périphériques en feuillure, ou munies de cornières ou tasseaux, ou autre système garantissant la bonne étanchéité acoustique. L'application d'un enduit permet une amélioration de cet affaiblissement.

Toutefois, cet indice d'affaiblissement acoustique ne permet pas à lui seul d'estimer l'isolement acoustique qui sera obtenu entre deux locaux. En effet, l'isolement acoustique (indice $D_{nT,A}$) est le résultat de toutes les transmissions : directes (estimées via l'affablissement R_w), mais aussi latérales et parasites. Les transmissions latérales dépendent beaucoup du contexte de mise en œuvre de la maçonnerie.

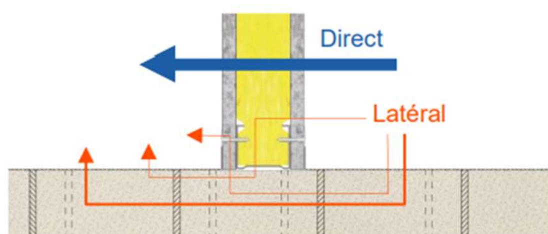


Fig. 9 : Transmissions acoustiques directes et latérales (Crédit : LASA)

Une étude spécifique a été réalisée par le BET acoustique LASA pour proposer des solutions de mise en œuvre en fonction des objectifs d'isolement acoustique entre locaux, lorsque la maçonnerie BTC est utilisée en paroi latérale (cf. B.1.3 et annexe 5, ou contacter Cycle Terre).

[4] Au sens du document « Classement des locaux en fonction de l'exposition à l'humidité des parois » (e-cahier CSTB 3567 – mai 2006).

[5] Limiter la durée d'exposition à 80% d'humidité relative permet de limiter le risque que la maçonnerie atteigne sa teneur en eau d'équilibre dans ces conditions (estimée à 3%) (cf. B.1 et B.2.6).

MC

2. MATÉRIAUX

2.1. BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE CYCLE TERRE

Les BTC Cycle Terre utilisés pour la réalisation des cloisons sont des blocs pleins sans emboîtement conformes à la norme XP P13-901 (version octobre 2001).
Ils sont obtenus par compression de terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat.

Les BTC Cycle Terre utilisables pour la réalisation des cloisons objet de cette ATEx sont de deux types :
- Les blocs non stabilisés (BTC) : ils sont composés d'un mélange de terre argileuse et de sable de 0/2 mm à 0/4 mm (environ 35% en masse), permettant une correction granulaire[6] ;
- Les blocs stabilisés (BTCS) : un liant hydraulique (environ 5% de ciment, en masse) est ajouté à la terre pour améliorer les performances des BTC, notamment la résistance à l'humidité.

Les détails et dimensionnements maximum décrits dans cette ATEx se réfèrent à une maçonnerie en BTC non-stabilisé. Il est possible de remplacer la maçonnerie non-stabilisée par de la maçonnerie stabilisée, dont les caractéristiques mécaniques sont plus favorables. L'usage de BTCS est en particulier recommandé pour le premier lit de maçonnerie lorsqu'une protection renforcée à l'humidité est recherchée (cf. partie A.4.3.5. "Jonctions avec les ouvrages adjacents").

2.1.1. CARACTÉRISTIQUES DES BTC(S)

Tableau 3 : Synthèse des principales caractéristiques des BTC Cycle Terre

	BTC		**BTCS**
Classe de résistance selon XP P13-901	Rc2	Rc4	Rc5
Masse volumique apparente (selon XP P13-901)	Mv 1,9 (2 +/- 0,1 kg/dm^3)		Mv 1,8 (1,9 +/- 0,1 kg/dm^3)
Résistance minimum garantie (mesurée selon la NF EN 772-1)	Etat sec : 2 Mpa	Etat sec : 4 Mpa Etat humide[7] : 3 MPa	Etat sec : 5 Mpa Etat humide[8] : 3,5 MPa
Comportement sous l'effet du gel et de l'humidité[9] (selon XP P13-901)	Classe 3		Classe 2
Résistance à l'abrasion minimum garantie (selon XP P13-901)	0,5g/cm^2	0,2g/cm^2	0,05g/cm^2
Résistance aux chocs durs (selon NF P 08-301)	Classement Q3[10]		

Remarque : La norme XP P13-901 (version initiale datée de 2001) est l'objet d'une mise à jour en 2022. Les valeurs et classements indiqués correspondent à la version 2022.

En usage intérieur, conformément au cahier 3546_V2 de février 2008 du CSTB, le classement Q3 en résistance aux chocs durs suffit à une mise en œuvre en tout emplacement, y compris en rez-de-chaussée non protégé, y compris en ERP. Des seuils minimums de résistance à l'abrasion (voire une protection mécanique du mur) sont proposés en fonction de l'exposition des parois à l'érosion de passage (cf. A.4.1).

---

[6] Les granulats pour BTC sont conformes à la norme NF EN 13139.

[7] L'état humide pour les BTC est défini à 3% de teneur en eau (les simulations hygrométriques des parois montrent une teneur en eau maximale de 2,7% en locaux humides, cf. B.2.6).

[8] L'état humide pour les BTCS est défini à 13% de teneur en eau (correspondant à 2h d'immersion des BTCS).

[9] L'obtention de la classe 3 implique des essais de résistance à l'humidité par contact ; l'obtention de la classe 2 implique des essais de résistance à l'humidité par contact, des essais d'immersion et des essais au gel.

[10] Classement selon le cahier CSTB 3546_V2 de février 2008

MC

Ces valeurs sont des valeurs minimales garanties dans le cadre du plan d'assurance Qualité de la Fabrique Cycle Terre.

2.1.2. Formes et dimensions des BTC Cycle Terre

Les BTC Cycle Terre utilisés pour les cloisons sont des blocs parallélépipédiques. Ils peuvent être classés dans le groupe 1, Éléments pleins ou constitués de trous de faible importance selon l'Eurocode 6[11].

Dimensions
Leurs dimensions (mesurées selon XP P13-901) sont :

- **L 315 x l 95 x h 95 mm pour les BTC Cycle Terre format "parement"**
- **L 315 x l 150 x h 95 mm pour les BTC Cycle Terre format "classique",**
- **L 220 x l 220 x h 95 mm pour les BTC Cycle Terre format "carré".**

Les tolérances dimensionnelles sont celles de la XP P13-901 (+- 3mm sur l'épaisseur et la longueur et +5/-2 sur la hauteur).

- D'autres formats de BTC peuvent être produits à la demande pour utilisation dans le cadre de cette ATEx. Ces blocs devront respecter les consignes suivantes : Aucune dimension ne pourra être inférieure à 60mm (hors découpe de bloc pour les besoins du calepinage) ;
- L'élancement maximal des BTC est de 5 ;
- La longueur maximale des BTC est de 45cm.

Empreintes
Une ou deux empreintes, en creux, de dimensions 250 x 20 x 8 mm, sont situées sur les deux faces de pose des BTC format parement et format classique.

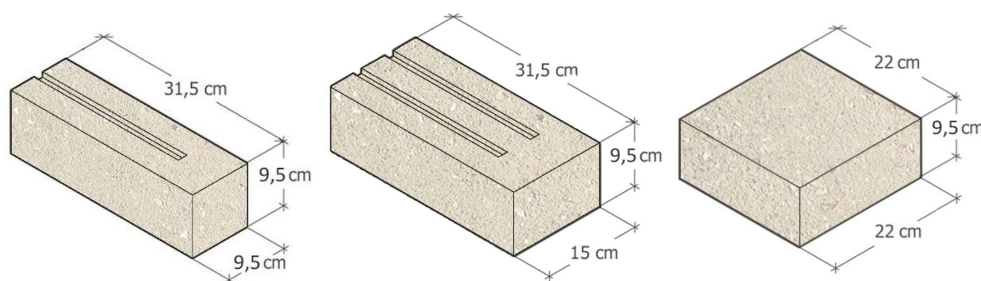


Fig. 9 : Exemples de BTC Cycle Terre de différents formats : format parement, format classique avec empreinte, format carré

2.2. MORTIERS DE POSE POUR BTC CYCLE TERRE

La pose des BTC est exécutée avec le mortier à BTC "terre" Cycle Terre prêt à l'emploi.
Le mortier pour BTC Cycle terre est composé d'un mélange de terre argileuse, identique à la terre des BTC, et de sable[12] permettant une correction granulaire. La fraction sableuse est plus importante afin d'améliorer la maniabilité tout en diminuant le retrait (environ 70% en masse). Le sable utilisé est un sable 0/2 mm à 0/4 mm.
Dans le cas où des BTC stabilisés seraient utilisés, il est recommandé d'utiliser soit un mortier bâtard de type M5 préparé conformément aux descriptions de l'annexe nationale de l'EC6, soit le mortier terre Cycle Terre stabilisé par ajout de 15% (en masse) de ciment.

2.2.1. Constituants à ajouter

Liants :

[11] Tableau 3.1 de l'Eurocode 6 - groupe 1 : bloc dont le pourcentage de volume des alvéoles (trous, réservation, évidemment...) est inférieur à 25 %.
[12] Les granulats pour mortiers sont conformes à la norme NF EN 13139.

MC

Les caractéristiques mécaniques du mortier de pose doivent être adaptées aux BTC utilisés : classe de résistance et stabilisation. Ainsi, dans le cas de BTC stabilisés, le même liant entrant dans la composition des blocs (ciment) doit être ajouté au mortier sur chantier, suivant le dosage de recette Cycle Terre prescrit. Le liant doit porter le marquage CE.

Eau de gâchage :
L'eau de gâchage d'un mortier doit être propre (eau claire et non acide).
L'eau de gâchage doit répondre aux prescriptions de la norme NF EN 1008.
L'eau potable convient pour la réalisation des mortiers.

2.2.2. Caractéristiques du mortier

Le mortier Cycle Terre présente les performances suivantes :

Tableau 4 : Principales caractéristiques du mortier terre

Caractéristiques	**Mortier**	***Protocole de mesure***
Masse volumique sèche	1750 kg/m³	*Mesurée selon EN 1015-6*
Résistance en compression	2 MPa	*Mesurée selon EN 1015-11*
Résistance à la traction (par flexion) [13]	0,6 MPa	*Mesurée selon EN 1015-11*

Mortier pour jointoiement après coup de maçonnerie apparente :
Dans le cas d'un rejointoiement après coup, le mortier Cycle Terre devra être utilisé.

2.3. ENDUIT

Dans le cas A, si le bardage ventilé est de type XIII, un enduit devra être appliqué sur la face extérieure de la maçonnerie. Si le bardage ventilé est de type XIV, cet enduit n'est obligatoire que si un niveau important d'étanchéité à l'air est recherché, et il peut être appliqué soit sur la face extérieure soit sur la face intérieure de la maçonnerie.
Dans le cas où l'enduit serait appliqué en finition intérieure, se reporter au paragraphe A.2.6.2.
Dans le cas où l'enduit serait appliqué entre la maçonnerie et l'isolant : cet enduit pourra être soit un enduit terre (éventuellement adjuvanté de fibres), soit un enduit chaux.
En l'absence d'isolant, cet enduit devra être un enduit à la chaux appliqué sur la face extérieure de la maçonnerie.

Cet enduit et les modalités de pose envisagées devront être conformes aux *Règles professionnelles, Enduits sur supports composés de terre crue* (Réseau Écobâtir, éditions Le Moniteur, Paris, septembre 2013).
En particulier, l'utilisation d'un enduit étanche aux transferts d'humidité est proscrite. Il est conseillé que l'enduit soit très perméable à la vapeur d'eau, c'est-à-dire tel que sa résistance à la diffusion de la vapeur d'eau Sd soit faible et dans tous les cas inférieure à celle de la maçonnerie BTC (estimée à 1,5m en 15cm d'épaisseur et à 2,2m en 22cm).

2.4. ATTACHES DE LIAISON

La liaison de la maçonnerie avec la structure porteuse et les raidisseurs peut être assurée par des attaches en acier non corrodable de type SPB 125 ou SPV 125 ou SP21 ou SP28 de Ancon ou équivalent disposées dans l'épaisseur des joints horizontaux du remplissage.
Ces attaches mesurent 125mm de long et sont fixés au cadre support :

[13] Cette valeur est donnée à titre indicatif. Elle n'est pas utilisée dans les justifications techniques.

MC

- Soit via un trou de 7mm de diamètre (SPB) ;
- Soit via un trou oblong de 8 x 30mm (SPV) ;
- Soit via un rail coulé dans le béton (SP21 avec rail 21/18) ;
- Soit via un rail fixé en surface (SP28 avec rail 28/15).



Fig. 10 : Attache SPB et SP28 de Ancon (Crédit : Ancon)

Dans le cas A, et dans le cas d'une ossature bois porteuse, si un système de liaison par attaches est préféré à un système de liaison par profil du poteau (cf. A.4.3.4), alors seules les attaches sur rail de type SP21 ou SP28 sont autorisées.

Dans le cas où l'usage d'autres références d'attaches serait souhaité (par exemple avec manchon de décollement type PPV ou PPB ou PP21 de Ancon), celles-ci devront :

- être conformes à la NF EN 845-1 ;
- avoir été l'objet d'un essai à l'arrachement selon la norme NF EN 846-7 justifiant de la résistance au cisaillement des attaches dans la maçonnerie BTC (cf. A.4.3.4).

Elles sont fixées dans un support bois ou béton (éventuellement via un rail intermédiaire) avec des chevilles ou vis de capacité supérieure à l'effort de cisaillement retenu pour le dimensionnement (cf. A.4.3.4). Cette capacité des chevilles ou vis de fixation sera déterminée selon prescriptions du fabricant.

2.5. OSSATURE SECONDAIRE, ISOLANT THERMIQUE ET REVETEMENT EXTERIEUR

2.5.1. Cas A

Le revêtement extérieur sera constitué d'un bardage fixé sur une ossature secondaire. Il ne peut pas s'agir d'un système d'enduit sur isolant (ETICS). Des exemples de bardage compatibles avec la mise en œuvre décrite dans cette ATEx (cas A) sont présentées en annexe.

Ossature secondaire

Le parement est fixé sur une ossature secondaire composée de chevrons en bois ou de montants métalliques.
Les chevrons ou montants, disposés en réseau vertical, sont fixés uniquement sur la structure primaire du bâtiment via :

- De préférence, trois attaches de liaison par chevron ou montant, disposées en quinconce de part et d'autre du chevron ou montant. Cette disposition nécessite que le chevron ou montant file sur 2 niveaux ;
- Ou, lorsque le chevron ou montant ne peut être fixé qu'en deux points de la structure primaire, quatre attaches de liaison, disposées de part et d'autres du chevron ou montant. Ceci est en particulier le cas en ossature porteuse en bois, pour laquelle la longueur des chevrons ne peut excéder un étage.

Les chevrons ou montants composant l'ossature secondaire doivent présenter une durabilité suffisante et être adaptés au type de parement mis en œuvre. Ils doivent présenter une section assurant :

- Une déformabilité sans conséquence préjudiciable sous l'action des agents climatiques (hygrothermique, vent)[14],
- Une largeur « vue » (face avant des chevrons ou montants) correctement adaptée au dimensionnement et à la position des fixations des revêtements extérieurs et des lisses éventuelles.

[14] Par exemple, en zone de vent 2 (Ile de France), une section de 6x8cm convient pour une longueur de chevron de 3m sans fixation intermédiaire

MC

Les chevrons en bois, montants métalliques et attaches de liaisons doivent être conformes aux référentiels techniques propres à chaque système (DTU, Avis Techniques, ATEX ou Règles Professionnelles)[15]. On rappelle que dans le cas de bâtiments à ossature bois, les chevrons (bois ou métal) devront être recoupés à chaque niveau / dalle de plancher et leur longueur ne devra pas dépasser 3m.

Isolant
Les isolants utilisés sont conformes aux Recommandations professionnelles RAGE 2015 "Mise en œuvre des procédés de bardage rapporté à lame d'air ventilée" ou bénéficient d'un Avis Technique ou d'une ATEx pour garantir leurs adéquations avec l'usage proposé, qui n'est pas inclus dans cette ATEx.

L'épaisseur de l'isolant est déterminée par les exigences acoustiques et thermiques de chaque projet. L'isolant est embroché sur les pattes de fixation des chevrons ou montants et fixé au mur support BTC avec des chevilles de type INCO II d'Etanco ou équivalent. Les mesures de résistance à l'arrachement de ces attaches dans la maçonnerie BTC sont comparables à celles de matériaux usuels (béton, pierre) et les préconisations de pose relatives à ces matériaux sont donc valables pour la maçonnerie BTC (cf. B.1.1.7).

Le facteur de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau des BTC est de l'ordre de $\mu = 10$[16], soit une valeur Sd pour un mur de 15 cm d'épaisseur : $Sd = \mu \times d = 1{,}5$ m et pour un mur de 22 cm d'épaisseur : $Sd = \mu \times d = 2{,}2$ m.
Afin de ne pas porter atteinte à la capacité de régulation hygrothermique de la terre crue et d'éviter tout problème de condensation, l'utilisation d'un matériau isolant étanche aux transferts d'humidité est proscrite. Il est conseillé que l'isolation et son éventuel revêtement soient très perméables à la vapeur d'eau, et dans tous les cas que leur Sd soit inférieur à celui de la maçonnerie BTC et de l'éventuel enduit en face extérieure de maçonnerie.

Il est possible de ne pas isoler le remplissage de façade en BTC dans le cas où le local intérieur n'est pas chauffé.

Parement
Le parement apporte l'aspect extérieur et participe à l'étanchéité à la pluie de la paroi. Il s'agit donc d'un parement correspondant à un mur de type XIII ou XIV au sens du DTU 20.1, fixé sur une ossature secondaire et ménageant une lame d'air.
La mise en œuvre du revêtement extérieur n'est pas traitée dans ce document. Il conviendra de s'assurer de l'adéquation entre les exigences de ce document et les prescriptions des référentiels techniques dont il relève (norme NF DTU, Avis Technique, Appréciation Technique Expérimentale ou Document Technique d'Application).

Lorsque la règlementation exige la prise en compte de dispositions vis-à-vis du risque de propagation du feu en façade, c'est-à-dire en particulier en bâtiment d'habitation 3ème et 4ème famille et certains ERP comportant plus de 2 niveaux (≥R+2), la performance du système de façade doit être démontrée par ailleurs (appréciation de laboratoire[17] ou conformité à un guide de préconisations disponible à date).

2.5.2. Cas B

La maçonnerie BTC n'a dans ce cas que le rôle d'un doublage intérieur de façade. Le mur assurant l'étanchéité de la façade devra être conforme au DTU dont il relève.

S'il n'est pas couvert par une norme NF DTU ou un Document Technique d'Application, il est fortement recommandé que l'isolant bénéficie d'un Avis Technique ou d'une ATEx pour garantir son adéquation avec la pose envisagée, cette pose n'étant pas traitée dans ce document.

---

[15] Pour de plus amples détails relatifs à la mise en œuvre de bardage sur bâtiments à ossature béton, les concepteurs pourront se référer aux Recommandations professionnelles RAGE 2015 "Mise en œuvre des procédés de bardage rapporté à lame d'air ventilée". Pour de plus amples détails relatifs à la mise en œuvre de bardage sur bâtiments à ossature bois, les concepteurs pourront se référer aux documents suivants : Exigences applicables aux façades légères à ossature en bois ou en métal comportant en revêtement extérieur une peau de bardage - Note d'information 7 (Cahiers du CSTB, Cahier 3450, mars 2003) et Guide d'aide à la conception de bardages en terre cuite sur construction ou façade à ossature bois, Solidéo et CSTB, Novembre 2020

[16] *Etat de l'art Caractéristiques hygrométriques, mécaniques et thermiques de la terre crue*, CRAterre, 2011

[17] Dans le cas d'une ossature béton porteuse, d'une ossature secondaire métallique et d'un isolant A1, l'appréciation de laboratoire peut être obtenue sans réalisation d'essai supplémentaire. Dans les autres cas, si la performance du bardage n'est pas déjà démontrée par ailleurs, alors l'efficacité du système de façade devra s'appuyer sur un essai LEPIR (qui servira de base à une appréciation de laboratoire).

MC

De même, la mise en œuvre du revêtement extérieur n'est pas traitée dans ce document. Il pourra s'agir soit d'un parement supporté par une ossature secondaire, soit d'un enduit sur panneau isolant. Il conviendra de s'assurer de l'adéquation entre les exigences de ce document et les prescriptions de la norme NF DTU, l'Avis Technique, l'Appréciation Technique Expérimentale ou le Document Technique d'Application dont il relève.

Lorsque la règlementation exige la prise en compte de dispositions vis-à-vis du risque de propagation du feu en façade, la performance du système de façade doit être démontrée par ailleurs par une appréciation de laboratoire. En janvier 2022, la maçonnerie BTC Cycle Terre dispose de 3 PV d'essai au feu garantissant :

- Un classement EI30 en maçonnerie d'épaisseur 9,5cm et de hauteur inférieure à 3m en ossature bois ;
- Un classement EI45 en maçonnerie d'épaisseur 9,5cm et de hauteur inférieure à 3m en ossature béton ;
- Un classement EI240 en maçonnerie d'épaisseur 15cm et de hauteur inférieure à 3m en ossature béton.

Contacter Cycle Terre pour connaître les détails de mise en œuvre associés et les éventuels PV supplémentaires obtenus par la suite.

MC

2.6. FINITIONS INTÉRIEURES

La maçonnerie en BTC peut soit rester apparente, soit recevoir d'autres finitions telles qu'un fixateur ou un enduit perspirant.

2.6.1. FIXATEUR, VERNIS OU PEINTURE

La maçonnerie de BTC est destinée dans la plupart des cas à rester apparente sans traitement particulier de finition.
Toutefois, sur les murs particulièrement sollicités (contact par frottement), il est possible d'appliquer un fixateur, un vernis (type vernis pour support pierre) ou une peinture (type peinture à base minérale), pour éviter que des poussières ou grains fins ne se détachent du mur. Des seuils minimums de résistance à l'abrasion sont proposés en fonction de l'exposition des parois à l'érosion de passage (cf. A.4.1). L'application d'un traitement de surface participe à augmenter la résistance à l'abrasion des BTC. Des mesures de résistance à l'abrasion devront alors être réalisées selon le protocole de la norme NF XP P13-901 sur un BTC traité en surface.

Il conviendra d'employer des solutions non filmogènes et perméables à la vapeur d'eau.

Il faudra se référer aux caractéristiques et aux fiches produits des fabricants pour vérifier la compatibilité avec le support terre crue. Il s'agit souvent de produits à badigeonner ou à pulvériser sur les surfaces à traiter. Quelques références commerciales existent, citons par exemple les produits de type Tierrafix Nature et Harmonie®. Il existe également de nombreuses recettes fait de différents adjuvants, liquides ou en poudre, qui sont adaptés aux supports en BTC, et généralement utilisées pour la finition des enduits[18]. Ce sont la plupart du temps des recettes ou produits à base de caséine, de sel d'alun, de méthylcellulose (colle à papier peint), des badigeons à base de chaux ou des solutions à base d'huile.

> Il est recommandé de pratiquer des essais sur des surfaces d'environ 1 m² afin de vérifier la bonne compatibilité de la recette avec le support et de valider le rendu esthétique et l'adéquation avec les niveaux attendus de sollicitation.

2.6.2. ENDUIT

Les mortiers d'enduits Cycle Terre produits par la fabrique peuvent être utilisés comme enduits sur les maçonneries de BTC, en particulier pour améliorer l'étanchéité à l'air de la maçonnerie en partie courante.
Il est rappelé que les mortiers d'enduits Cycle Terre sont produits à partir de la même terre que celle utilisée pour les BTC et BTCS, que leur formulation est très proche de celle du mortier de pose, et que l'ajout de sable dans les mortiers et enduits réduit leur sensibilité au gonflement / retrait.

Par ailleurs, la résistance à l'arrachement des mortiers d'enduits Cycle Terre sur maçonnerie en BTC Cycle Terre est compatible avec les exigences des règles professionnelles pour la mise en œuvre des enduits sur supports composés de terre crue (*Règles professionnelles, Enduits sur supports composés de terre crue*, Réseau Écobâtir, éditions Le Moniteur, Paris, septembre 2013) (cf. B.2.5). Dans le cas où un autre enduit serait utilisé, le concepteur s'assurera de sa compatibilité avec le support en maçonnerie BTC selon ces mêmes règles professionnelles.

---

[18] *Règles professionnelles, Enduits sur supports composés de terre crue*, Réseau Écobâtir, éditions Le Moniteur, Paris, septembre 2013 ; *Guide des bonnes pratiques de la construction en terre crue - enduit en terre*, ARESO, ARPE Normandie, AsTerre, ATOUTERRE, CAPEB, Collectif des terreux armoricains, FFB, Fédération des SCOP du BTP, Maisons paysannes de France, Réseau Écobâtir, TERA, décembre 2018. *Argiles et biopolymères : les stabilisants naturels pour la construction en terre*, Vissac, Aurélie, Ann Bourgès, David Gandreau, Romain Anger, et Laetitia Fontaine. Villefontaine : CRAterre, 2017.

MC

3. DESCRIPTION DE LA FABRICATION

3.1. VOLUMES DE PRODUCTION

Capacité moyenne prévue sur les trois premières années de production du site :
BTC et BTCS : 5000 t/an (environ 380 000 blocs/an) soit 11 500 m² de mur maçonné de 15 cm d'épaisseur
Mortier : 920 t/an

Ces BTC(S) sont produits sur le site de la Fabrique Cycle Terre : 2 bis rue Paul Langevin à Sevran (93270).

3.2. PRÉPARATION DE LA TERRE

3.2.1. Préparation

La préparation de la terre (homogénéisation, criblage, séchage) est externalisée auprès du groupe ECT, partenaire Cycle Terre spécialisé dans la valorisation de terres inertes et autres déblais de chantiers.
Une fois la terre de chantier d'excavation sélectionnée, un stock sous forme de tas de l'ordre de 5000 t de terre est constitué.
La terre est sélectionnée conformément au processus décrit dans le Plan d'Assurance Qualité de la Fabrique Cycle Terre, c'est-à-dire :

- Etape 1 : Pré-sélection de chantier d'excavation sur la base d'une analyse des études géotechniques (G1 ou G2 AVP) et environnementales de préparation de chantier ;
- Etape 2 : Confirmation de la conformité de la terre excavée via la réalisation des essais suivants :
  - granulométrie et sédimentométrie (selon protocole NF EN ISO17892-4),
  - limites d'Atterberg et indice de plasticité (selon protocole NF EN ISO 17892-12).
  - Si les essais précédents confirment l'intérêt de la terre, évaluation du retrait et de la cohésion sèche de la terre par essai Sandrammer (voir protocole en fiche P1 du CPU).
- Etape 3 : Confirmation de la conformité des produits obtenus par la réalisation des essais suivants :
  - Vérification des performances sur BTC et BTCS :

Mesures	Protocoles de mesure
Masse Volumique Apparente (MVA)	XP P 13-901
Résistance à la compression	NF EN 772-1
En cas de validation, essai complémentaire :	XP P 13-901
Résistance à l'abrasion	XP P13-901
Essai de perte de masse en immersion (BTCS)	Voir fiche P3 du CPU

  - Vérification des performances sur mortier :

Mesures	Protocoles de mesure
Retrait linéaire	Voir fiche P4 du CPU
Résistance à la compression	NF EN 1015-11 : 2000
Résistance à la traction / flexion	NF EN 1015-11 : 2000
Adhérence mortier sur bloc	Voir fiche P5 du CPU

  - Vérification des performances sur enduit :

Mesures	Protocoles de mesure
Résistance à l'abrasion	Voir fiche P6 du CPU
Adhérence de l'enduit au support	Voir fiche P7 du CPU

Suite à la réalisation de ces essais et en cas de confirmation de la sélection de la terre, les rapports d'essai correspondants seront envoyés au CSTB.

MC

La terre dédiée à la production de BTC(S) est séchée à l'air libre puis broyée à 10 mm, avant d'être à nouveau séchée sous couvert.
La terre dédiée à la production de mortier est séchée à l'air libre puis broyée à 2 mm et mise en big bag. A chaque étape de préparation (minimum 4), un tas de terre est produit par empilement de couches horizontales et repris ensuite par une exploitation frontale et sur toute l'épaisseur de la couche (ou sur une forte épaisseur) de façon à recouper la stratification des couches empilées et permettre ainsi une bonne homogénéisation du lot de terre. La terre est transportée par camion de la zone de préparation à la Fabrique Cycle Terre, zone de production des matériaux.

3.2.2. Stockage des matières premières

La terre homogénéisée et le sable sont stockés dans des boxs de stockage. Afin de conserver le taux d'humidité des terres livrées, les espaces de stockage sont couverts et leur sol empêche les remontées capillaires. Des murets délimitent les différents boxs de stockage et évitent la contamination des différents matériaux entre eux.
Les liants artificiels destinés à la fabrication sont stockés en sac ou en big-bags sur palettes, sous abri, protégés de la pluie, des remontées d'humidité du sol par capillarité et des projections de boue.
Les différents types de liant nécessaires à la fabrication présentent un stockage séparé pour éviter des erreurs ou des mélanges accidentels.

3.3. PROCESSUS DE FABRICATION DES BTC

3.3.1. Dosage et malaxage des matières premières

Le mélange des matières premières se fait à l'aide d'une centrale de mélange de type « centrale à béton ». La terre et le sable sont transportés par un chargeur depuis les espaces de stockage. Ils sont chargés dans les 2 trémies alimentatrices doseuses de la centrale de mélange. Les trémies alimentent automatiquement le malaxeur planétaire de la centrale grâce à l'unité de commande de la centrale selon la formulation du mélange à produire. Le malaxeur est pourvu d'un système de pesée intégré, d'équipements de dosage et d'une unité de commande pilotée par logiciel. Pour les BTC stabilisés, le liant est dosé à l'aide d'une trémie crève-big bag et transporté par un convoyeur à vis directement dans le malaxeur. Le malaxeur mélange les matières à sec, puis les matières premières sont humidifiées dans le malaxeur. Un système de pulvérisation d'eau intégré au malaxeur permet une bonne répartition de l'eau pour assurer un mélange rapide et homogène. L'eau est dosée automatiquement grâce à l'unité de commande de la centrale et contrôlée par un capteur dans la cuve de malaxage. Un temps de malaxage minimum est défini pour permettre l'obtention d'un mélange homogène.

3.3.2. Compression

La compression des BTC se fait à l'aide d'une presse hydraulique à double compression verticale spécialement conçue pour la production de blocs de terre comprimée. La production se fait par campagnes de matériaux, la presse produisant alternativement des BTC stabilisés ou non stabilisés. Une trémie doseuse est alimentée en mélange prêt à l'emploi depuis le tapis cranté provenant de la centrale de mélange. Située au-dessus de la presse, elle dose automatiquement la matière nécessaire à une pression selon les données du poste de commande. Le séquençage entre la centrale en amont et la presse n'étant pas automatisé, ce sont les opérateurs de la presse et de la centrale qui surveillent le bon déroulement de l'alimentation en mélange de la trémie doseuse de la presse depuis la centrale.
Des moules interchangeables permettent de produire des blocs de différentes dimensions. Un à quatre BTC peuvent ainsi être produits à chaque action de compression.

3.3.3. Palettisation

La palettisation des blocs est assurée par un bras robotisé automatisé selon un calepinage adapté au type de bloc produit. Un convoyeur à rouleaux en sortie de presse convoie les blocs vers le robot implanté dans une zone de travail sécurisée.

3.3.4. Cure et séchage des matériaux produits

Séchage des BTC non stabilisés
En sortie de production, les palettes de BTC sont emmenées par chariot élévateur dans une zone couverte hors gel pour séchage pendant 1 semaine minimum. Au bout d'une semaine, les palettes sont transportées en zone de stockage sous abri où elles sèchent durant 3 semaines.

MC

Cure humide des BTC stabilisés
Les BTC stabilisés doivent effectuer une cure en atmosphère humide durant environ 3 semaines pour éviter l'évaporation trop rapide de l'eau et favoriser une meilleure prise/hydratation des liants. Ceci permet d'obtenir les caractéristiques attendues du liant durci (résistance en compression, résistance au gel-dégel, durabilité, étanchéité, etc.).
Les palettes de BTC stabilisés sont filmées immédiatement après production pour permettre cette cure humide. Elles sont transportées, par chariot élévateur, dans une zone couverte hors gel pour une durée minimale de 7 jours. A la fin de ce délai, les palettes sont transportées par chariot élévateur en zone de stockage couverte extérieure où elles finiront leur séchage pendant 3 semaines minimum.

La campagne de vérification du bon déroulement de ces phases de cure et de séchage est décrite dans le CPU de la Fabrique.

3.3.5. Conditionnement et stockage

Les palettes de BTC sont ensuite filmées avec des housses en plastique thermo-rétractables à l'aide de pistolets de rétraction gaz.
Jusqu'à leur livraison, les palettes filmées sont stockées sur des racks extérieurs abrités.
Les blocs sont vendus :

- en palette Europe d'environ 1 tonne filmée, soit environ 116 blocs format classique
- à l'unité.

3.4. PROCESSUS DE FABRICATION DU MORTIER

Le mortier de pose pour BTC produit par Cycle Terre est produit en sac de 25 kg ou en big-bag d'1 t.
L'ajout d'un liant hydraulique, si nécessaire, s'effectue sur le chantier suivant les proportions des recettes prescrites par Cycle terre (cf. guide de pose).

3.4.1. Dosage et mélange des matières premières

Le mélange des matières premières se fait à l'aide de la centrale de mélange également utilisée pour la ligne BTC, de type « centrale à béton mobile ». La terre et le sable sont transportés par un chargeur depuis les espaces de stockage. Ils sont chargés dans les 2 trémies alimentatrices doseuses de la centrale de mélange. Les trémies alimentent automatiquement le malaxeur planétaire de la centrale grâce à l'unité de commande selon la formulation du mélange à produire. Le malaxeur est pourvu d'un système de pesée intégré, d'équipements de dosage et d'une unité de commande par ordinateur. Il mélange des matières sèches, soit à un taux d'humidité en masse inférieur à 4%.
Un temps de malaxage minimum est défini pour permettre l'obtention d'un mélange homogène.

3.4.2. Conditionnement et stockage

Conditionnement en big-bags d'1 tonne
L'ensemble de la production de mortier est conditionné en big-bags à l'aide d'une station de remplissage à big-bags. Le mélange est déversé par un convoyeur à bande directement dans la trémie d'alimentation d'une station de remplissage de big-bags. Il passe au travers d'un tamis de sécurité vibrant afin de s'assurer de sa granulométrie < 2 mm. La station remplit l'équivalent d'un mélange de la centrale dans un big-bag, de l'ordre de 0,7 à 0,8 m^3 (+/- 1 tonne).

Conditionnement en sacs de 25 kg
Environ 50 % des big-bags de mortier sont reconditionnés en sacs de 25 kg par un poste d'ensachage semi-automatique. Un big-bag de mortier est positionné sur le poste de vidange à big-bags installé au-dessus de l'ensacheuse. L'opérateur positionne un par un des sacs "à gueule ouverte" vides sur l'ensachoir et déclenche le remplissage. Un système de pesée automatique permet d'arrêter le remplissage du sac. Le sac plein est lâché sur un convoyeur qui l'évacue vers un conformateur automatique pour y être cousu. Un convoyeur à rouleaux achemine les sacs pleins vers le poste de palettisation.
Les palettes de 40 sacs de mortier, d'environ 1 tonne, sont filmées avec des housses plastique thermo-rétractables à l'aide de pistolets de rétraction gaz.

Les big-bags et palettes de sacs sont stockés sur des racks dans un espace couvert et protégé des remontées d'humidité jusqu'à leur livraison. Le mortier est vendu :

- en sacs de 25 kg, conditionnés en palettes de 40 sacs
- en sacs de 25 kg, à l'unité
- en vrac, conditionné en big-bag (environ 1 t)

MC

3.5. CONDITIONS DE TRANSPORT DES PRODUITS

- Palettes de BTC avec housses thermo-rétractées
- Palettes de sacs de 25 kg de mortier avec housses thermo-rétractées
- Big-bags de mortier

3.6. CONTRÔLES

L'ensemble des étapes de la production est soumis à un Contrôle Qualité précis dont chacune des étapes est décrite dans le CPU de la Fabrique. Ce document rassemble les procédures de contrôle liées à la sélection des terres et à leur réception au centre de préparation, à leur préparation, à la réception des autres matières premières, à la production des BTC, à leur cure et à leur séchage, et à la production du mortier et des enduits.

MC

4. DIMENSIONNEMENT ET CONCEPTION

4.1. PRINCIPES DE CONCEPTION

Caractéristiques mécaniques de la maçonnerie BTC
La maçonnerie de BTC résiste bien en compression, mais mal en traction, flexion et cisaillement, il faut donc éviter ce type de sollicitations et limiter les actions de poinçonnement.

Principe structurel
Les maçonneries de BTC, autoporteuses, n'assurent qu'un rôle de remplissage. Elles n'ont pas de fonction structurelle (non porteuses, non contreventantes). Des attaches métalliques ou une liaison par prise en feuillure assurent la stabilité des pans de mur en liaison avec l'ossature principale et/ou les raidisseurs (cf. A.4.3.4).

Déformations du gros œuvre
La compatibilité des déformations verticales de l'ossature avec l'usage des BTC en panneaux de remplissage est assurée via la limitation des flèches de la structure primaire à 1/500e de leurs portées, dans la limite de 10 mm. Une (des) bande(s) résiliente(s) est (sont) intégrée(s) à l'interface entre l'ossature principale et la maçonnerie, soit en tête, soit en pied de mur, soit en tête et en pied, pour une épaisseur totale de 10 mm.

Les flèches nuisibles (ou actives) de la structure primaire autorisées sont donc au maximum de 10mm ou 1/500e de leurs portées, que la structure primaire soit en bois ou en béton.

Les limitations des déformations dans leurs plans des poteaux de l'ossature verticale en liaison directe avec la maçonnerie BTC sont limitées à H/300 à l'ELS, avec H la hauteur d'étage, dans la limite de 5mm, sauf liaison à la maçonnerie par prise en feuillure (cf. A.4.3.4) ou utilisation d'attaches de liaisons adaptées (avec manchon de décollement par exemple).

Les limitations des déformations hors plans des poteaux de l'ossature verticale en liaison directe avec la maçonnerie BTC sont limitées à H/500 à l'ELS, avec H la hauteur d'étage (cf. B.2.4).

Déformation de la maçonnerie sous son poids propre
Avec des modules instantanés et long terme de respectivement 1000 et 400 MPa, le fluage de la maçonnerie sous son poids propre est infra-millimétrique.

Variations dimensionnelles des matériaux
Le tassement vertical de la maçonnerie lors du séchage est de l'ordre de 3mm/m.
Le retrait horizontal de la maçonnerie est de l'ordre de 0,6mm/m. Les longueurs maximales des maçonneries précisées dans les tableaux 2 et 5 permettent de limiter le risque de fissuration de retrait (cf. A.4.2 et B.2.3).

Joints de dilatation
Des joints de dilatation spécifiques ne sont pas nécessaires dans la mesure où la maçonnerie est régulièrement recoupée par des raidisseurs. Les joints de dilatation de la structure doivent être prolongés au niveau des cloisons (cf. A.4.3.3. "Fractionnement par des joints de retrait ou de dilatation").

Résistance au feu et propagation de feu en façade
En janvier 2022, la maçonnerie BTC Cycle Terre dispose de 3 PV d'essai au feu (cf. B.1.2.2.) garantissant :
- Un classement EI30 en maçonnerie d'épaisseur 9,5cm et de hauteur inférieure à 3m en ossature bois ;
- Un classement EI45 en maçonnerie d'épaisseur 9,5cm et de hauteur inférieure à 3m en ossature béton ;
- Un classement EI240 en maçonnerie d'épaisseur 15cm et de hauteur inférieure à 3m en ossature béton.

Contacter Cycle Terre pour connaître les détails de mise en œuvre associés et les éventuels PV supplémentaires obtenus par la suite.

Conformément au §1.2.1 de l'IT249, la maçonnerie est susceptible de participer au calcul du C si elle bénéficie d'un classement EI supérieur ou égale à 30 (positionnement au-dessus du plancher) ou supérieur ou égal à 60 (positionnement sous le plancher, cette exigence étant ramenée au degré de résistance au feu requis pour la structure si celui-ci est inférieur à une heure).

MC

En bâtiments d'habitation 3ème et 4ème familles et certains ERP de plus de 2 niveaux (≥R+2), il est nécessaire de justifier de l'absence de propagation de feu en façade. La performance du bardage (y compris isolant et ossature secondaire) devra être démontrée par une appréciation de laboratoire ou être conforme à un guide de préconisations disponible à date, par exemple le guide « Bois construction et propagation du feu par les façades »[19]. Dans le cas d'une ossature béton porteuse, d'une ossature métallique secondaire et d'un isolant A1, cette appréciation de laboratoire peut probablement être obtenue sans réalisation d'essai supplémentaire[20]. Dans les autres cas, si la performance du bardage n'est pas déjà démontrée par ailleurs, alors cette appréciation de laboratoire devra probablement s'appuyer sur un essai LEPIR.

Étanchéité à l'air de la paroi
Dans le cas A, l'étanchéité à l'air est assurée en partie courante par la maçonnerie enduite sur une des deux faces. L'étanchéité de l'interface entre la maçonnerie et les raidisseurs est assurée par la mise en place de joints bande pré-comprimée et mastic. L'insertion d'éléments n'est autorisée que via la mise en œuvre de raidisseurs ou a minima la réalisation d'une interface en mortier de ciment, et le respect des prescriptions du fabricant de l'élément inséré ou de son PV d'étanchéité à l'air.

Isolement acoustique
Des R_w (C;Ctr) de 47 (-1 ; -4) dB et 50 (-1 ; -4) ont été estimés pour des maçonneries d'épaisseur respectives 15 et 22 cm, non enduite et avec des jonctions périphériques en feuillure, ou munies de cornières ou tasseaux, ou autre système garantissant la bonne étanchéité acoustique. L'application d'un enduit permet une amélioration de cet affaiblissement.
Un soin particulier sera apporté au calfeutrement des interfaces, notamment sur les côtés désolidarisés (interposition de bandes résilientes, de joints mousse expansée, de mastics, de tasseaux, cornières et autres systèmes à recouvrement etc.) afin de limiter les transmissions acoustiques parasites. Il appartient au concepteur de produire les études acoustiques d'adaptation des détails d'interfaces en fonction du contexte de mise en œuvre et des performances acoustiques recherchées. On rappelle que l'obtention in situ des performances acoustiques mesurées en laboratoire est très sensible à la bonne gestion des interfaces périphériques des cloisons.

Par ailleurs, une attention particulière doit être portée aux transmissions acoustiques latérales dans le cas où une cloison ou un mur de refends viendrait percuter la maçonnerie BTC en remplissage de façade (cf. B.1.3).

Résistance à l'abrasion et aux chocs durs de la maçonnerie
La partie courante de la maçonnerie est peu sollicitée à l'abrasion et peu sensibles aux chocs durs et ne nécessite donc pas de protections particulières dans la majeure partie des cas (cf. B.2.1). Il peut éventuellement être appliqué une finition de surface permettant de renforcer cette résistance sur tout ou partie de la maçonnerie (cf. A.2.6) ou une protection mécanique dans les zones où le risque d'abrasion est particulièrement élevé.
Les seuils minimum d'abrasion suivants sont proposés aux concepteurs en fonction de l'exposition des parois :

- Dans les locaux privés[21] : 2 cm²/g ;
- Dans les locaux accessibles au public :
    - Zone de circulation forte et pour la maçonnerie située à une hauteur inférieure à 1,3m : résistance à l'abrasion minimale de 15 cm²/g (obtenue par utilisation de BTCS ou par traitement de surface de BTC) ou protection mécanique de la maçonnerie ;
    - Zone de circulation moindre au vu de l'usage des locaux ou de l'aménagement de l'espace[22] et pour la maçonnerie située à une hauteur inférieure à 1,3m : abrasion minimale de 5cm²/g (obtenue par utilisation de BTC40 Cycle Terre ou par traitement de surface de BTC20) ;
    - Partie de maçonnerie de hauteur supérieure à 1,3m : 2 cm²/g

Principe de conception de la lame d'air (cas B uniquement)
Une lame d'air doit être ménagée entre le mur de façade et la maçonnerie BTC, d'épaisseur minimum 1cm.

---

[19] La dernière version disponible à ce jour est la V3.1 datée du 07/12/2020 élaborée par le CSTB et le FCBA.

[20] A confirmer au cas par cas en fonction de la configuration de l'ossature secondaire, du recoupement de la lame d'air et de la nature du bardage.

[21] Défini sur la base du classement proposé par la norme relative à la résistance aux chocs mous des cloisons (NF P18-301), c'est-à-dire en particulier dans les parties privatives de logements, bureaux, ou zones réservées au personnel des ERP.

[22] Par exemple obtenue par la présence de mobilier type tables de restauration, de classe, comptoir ou banquette limitant de fait la circulation de personnes à proximité des murs

MC

Une ventilation de la lame d'air permet d'augmenter la surface d'échange entre l'air ambiant et la maçonnerie BTC et améliorer ainsi l'inertie et la régulation hygrométrique du local. Une ventilation de la lame d'air est toutefois défavorable du point de vue acoustique.

Une ventilation de la lame d'air n'est pas nécessaire pour maintenir des niveaux d'humidité faibles dans la maçonnerie BTC y compris en locaux humides (cf. B.2.6). Il est toutefois demandé par précaution de ventiler la lame d'air lorsque la maçonnerie BTC se situe en local EB et lorsque le mur de façade (le pare-vapeur le cas échéant) présente une valeur Sd > 20 m. Dans ce cas, l'épaisseur de la lame d'air doit être supérieure à 2cm et une surface de ventilation supérieure à 1500 mm²/ml[23] répartie en pied et en tête de parement doit être ménagée via un lit de mortier ou des joints verticaux de première et dernière assise non garnis de mortier (1 par ml au minimum).

[23] conformément au seuil minimum de ventilation des lames d'air défini dans le cadre de la RT 2012

MC

4.2. DIMENSIONNEMENT .

Épaisseur minimum : 15 cm (cas A) ou 9,5 cm (cas B)

La hauteur maximale et la longueur maximale entre raidisseurs du remplissage varient en fonction de l'épaisseur de la maçonnerie et dans le cas A, de son exposition au vent (en première approximation la hauteur du bâtiment). Elles ont été déterminées soit par essais et application des limites géométriques précisées ci-dessous (essais aux chocs de sécurité, cas B), soit par mesures de résistance mécanique de la maçonnerie (NF EN 1052) et calcul selon la méthode proposée par la NF DTU 20.1 (cas A) (cf. B.1.1 et B.2.1).

Dans le cas A, ces dimensions maximales peuvent être adaptées par les concepteurs en s'appuyant sur la méthode de dimensionnement proposée par la NF DTU 20.1 et décrite au § B.1.1.5, notamment dans le cas de maçonnerie stabilisée.

Les essais aux chocs réalisés et les mesures de résistance à la flexion de la maçonnerie non stabilisée disponibles à l'heure actuelle ont permis de déterminer les dimensions maximales suivantes (sur la base des valeurs caractéristiques de résistance à la flexion suivantes : f_{xk1} = 0,05 MPa et f_{xk2} = 0,12 MPa, contacter Cycle Terre pour connaître les éventuelles mises à jour) :

Rappel du tableau 2 : Synthèse des dimensionnements de maçonnerie non stabilisée autorisés

CAS A :

	BTC ép 22cm								BTC ép 15cm	
	h = 3,2		h= 3		h= 2,6		h = 2,4		h = 2,2	h = 1,8
	H <10 m	H <28m	H <10 m	H <28m	H <10 m	H <28m	H <10 m	H <28m	H <10 m	H <28m
l (m)	2,9	2,1	3	2,2	3,1	2,3	3,3	2,4	2	2,3

Avec h la hauteur de maçonnerie, l la longueur de maçonnerie et H la hauteur du bâtiment

CAS B :

Longueur maximum de maçonnerie autorisée			
Epaisseur de maçonnerie :	Hauteur 260 cm	Hauteur 300 cm	Hauteur 400 cm
9,5 cm	350 cm	*Non autorisé*	*Non autorisé*
15 cm	430 cm	430 cm	*Non autorisé*
22 cm	612cm	612cm	612cm

On rappelle que la flèche de l'ossature porteuse étant limitée à 10mm, une mise en œuvre de la maçonnerie sur des longueurs supérieures à 500cm implique une limitation des flèches supérieure à H/500.

Par ailleurs, d'autres épaisseurs de maçonnerie sont possibles. Dans ce cas, le BET structure de l'opération devra déterminer la longueur maximale entre raidisseurs conformément à la méthode de dimensionnement proposée par la NF DTU 20.1 et décrite au § B.1.1.5. Les pans maçonnés devront par ailleurs respecter les dimensions maximales suivantes :

- Hauteur : Un élancement maximal de 20 est autorisé, dans la limite de 4m de haut, soit 3m de haut pour une maçonnerie de 15cm d'épaisseur et 4m de haut pour une maçonnerie d'épaisseur supérieure ou égale à 20cm ;
- Longueur : Une longueur maximale égale à 26 x (e + 1,5) + 1,5, avec e l'épaisseur du mur, dans la limite de 8m de long, soit 430 cm pour une maçonnerie de 15cm d'épaisseur et 612 cm pour une maçonnerie de 22cm d'épaisseur ;
- Diagonale : La longueur de la diagonale, en élévation, du pan de maçonnerie ne sera pas supérieure à 40 fois l'épaisseur du mur.

MC

4.3. DÉTAILS TECHNIQUES

4.3.1. CALEPINAGE - APPAREILLAGE

Calepinage
Le dessin du calepinage des maçonneries sera réalisé avant le lancement des travaux par l'entreprise en charge des documents d'exécution, maîtrise d'œuvre ou entreprise de construction selon les cas.
Afin d'identifier les problèmes de superposition des joints verticaux, il est conseillé de réaliser les plans :

- des deux premières assises ;
- des deux assises au-dessus du niveau des ouvertures ;
- des assises particulières.

Le calepinage permet de déterminer avec précision :

- la manière dont les blocs sont disposés (notamment pour prendre en compte les cas particuliers tels que les angles, les jonctions, les baies) ;
- les types de blocs nécessaires (entiers et fractions de blocs : ½, ¾, etc.) ;
- le nombre de blocs de chaque type.

Épaisseur des joints
Les joints ont une épaisseur comprise entre 10 et 15 mm.

Recouvrement minimum
En dehors des joints de fractionnement, les joints alignés verticalement sont proscrits d'une assise sur l'autre en partie courante des maçonneries. L'appareillage des blocs doit se faire impérativement à joints verticaux décalés pour garantir un comportement monolithique de la maçonnerie et éviter ce que l'on nomme un "coup de sabre", résultant de la superposition ou de la trop grande proximité de deux joints verticaux qui risque de favoriser la propagation de fissures structurales. Le décalage des joints verticaux sera toujours au minimum égal au 1/4 de la longueur du bloc entier[24]. Cette règle est plus contraignante que les exigences de l'EC6.

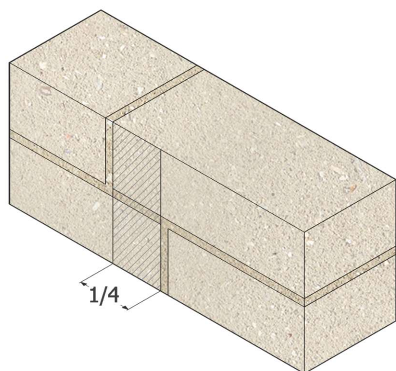


Fig. 12 : Recouvrement minimum - illustration avec BTC en format classique

Appareillage
Les BTC de format classique peuvent être appareillés en panneresse (maçonnerie de 15 cm d'épaisseur) ou sur chant (maçonnerie de 9,5 cm d'épaisseur, cas B uniquement).
Les BTC de format parement peuvent être appareillés en panneresse (maçonnerie de 9,5 cm d'épaisseur, cas B uniquement).
Les BTC de format carré peuvent être appareillés en panneresse (maçonnerie de 22 cm d'épaisseur).

[24] Des calepinages particuliers, permettant la réalisation de modénatures décoratives des blocs, sont possibles. Il est alors permis de déroger à cette règle sur une hauteur maximum de 3 assises de bloc et sur des surfaces limitées représentant au maximum 30 % de la surface du mur. La compatibilité de ces calepinages avec le maintien de la validité des PV d'essais au feu devra être vérifiée dans le cas où une performance au feu de la paroi est souhaitée.

MC

4.3.2. Liaisons basses

Traitement du pied de façade

Ce paragraphe concerne le cas A uniquement.

Il convient d'éviter les remontées capillaires par les fondations et les infiltrations directes d'eaux provenant de l'extérieur (eaux de ruissellement, de rejaillissement, etc.). Un soubassement réalisé dans un matériau résistant à l'eau assure cette protection.

Si des risques spécifiques existent sur la zone d'implantation (ruissellement, inondation, etc.), il conviendra d'augmenter en conséquence la hauteur du soubassement par rapport au sol extérieur fini. La rupture capillaire concerne l'ensemble des matériaux et composants de la paroi susceptibles d'être affectés par des remontées d'humidité.

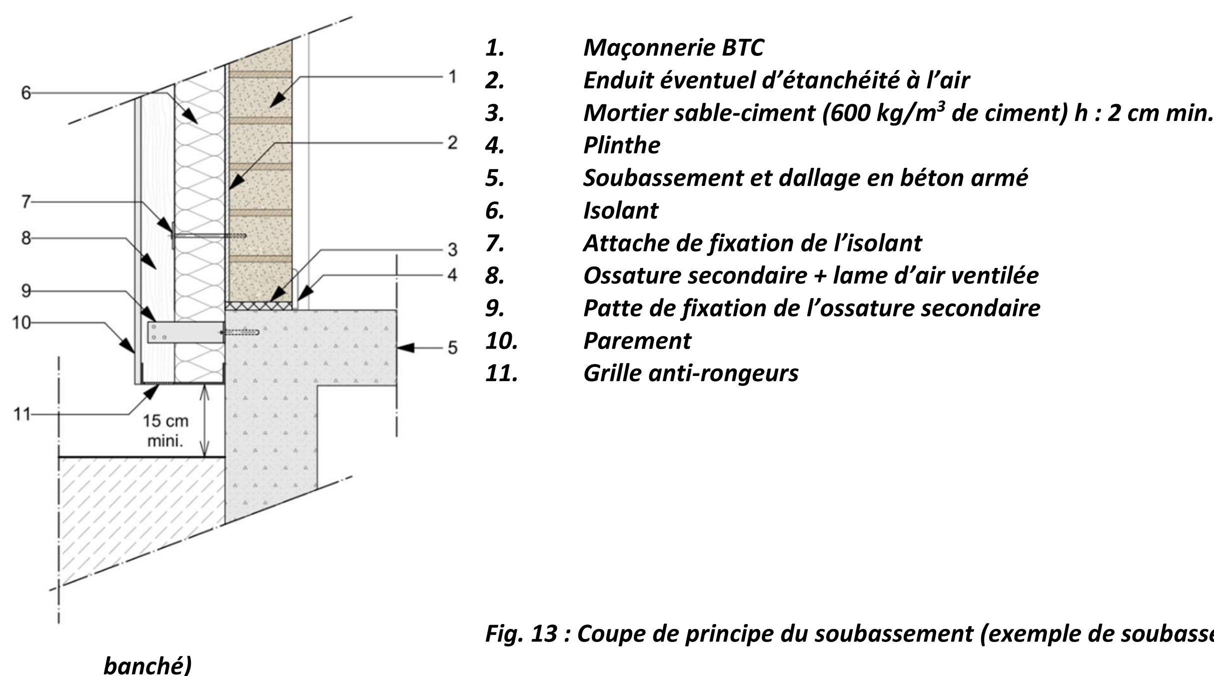
Dans le cas où le soubassement est réalisé en béton banché, il assure sans disposition complémentaire l'étanchéité à l'eau et la protection contre les remontées capillaires.

Si le soubassement est réalisé en maçonnerie de petits éléments, il doit être surmonté par une coupure de capillarité.
Cette coupure de capillarité est exécutée soit à l'aide :

- d'un chaînage en béton armé disposé au niveau du plancher bas du rez-de-chaussée ou du dallage sur toute l'épaisseur des maçonneries de soubassement
- d'une bande de feuille bitumineuse armée, ou de feuille plastique ou élastomère, posée à sec sur une couche de mortier de ciment[25], finement talochée, de 2 cm d'épaisseur après prise et séchage de ce dernier, et protégée par une deuxième couche de mortier de ciment de même épaisseur sommairement dressée. À leurs extrémités, les segments de bande sont placés à recouvrement minimal de 20 cm ;
- d'une chape de mortier hydrofugé de ciment[26].

La coupure de capillarité sera disposée à une hauteur minimale de 20 cm au-dessus du niveau le plus haut du sol extérieur fini.

En départ de bardage au niveau bas, une entrée de ventilation de section suffisante doit être aménagée. L'ouverture est protégée par un profilé à âme perforée constituant une barrière anti-rongeurs.



1. *Maçonnerie BTC*
2. *Enduit éventuel d'étanchéité à l'air*
3. *Mortier sable-ciment (600 kg/m³ de ciment) h : 2 cm min.*
4. *Plinthe*
5. *Soubassement et dallage en béton armé*
6. *Isolant*
7. *Attache de fixation de l'isolant*
8. *Ossature secondaire + lame d'air ventilée*
9. *Patte de fixation de l'ossature secondaire*
10. *Parement*
11. *Grille anti-rongeurs*

Fig. 13 : Coupe de principe du soubassement (exemple de soubassement en béton banché)

[25] omme défini dans la norme NF DTU 20.1 P1-2 (CGM)
[26] comme défini suivant le paragraphe 3.6.5 de la norme NF DTU 20.1 P1-2 (CGM)

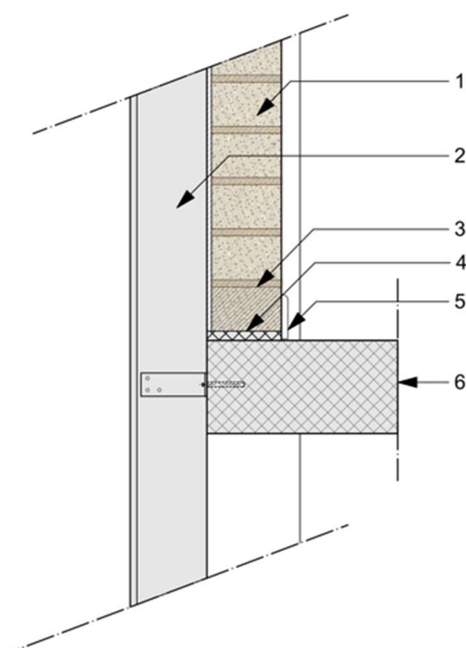
MC

Les dallages ou planchers bas, quel que soit leur type (désolidarisé, liaisonné, etc.), devront être positionnés au niveau du soubassement (en béton armé ou maçonnerie). En aucun cas le dallage ne pourra être connecté au mur en BTC. Les dallages sur terre-plein devront être conformes au DTU 13.3.

Traitement du pied de maçonnerie en étage courant
Lorsqu'aucune désolidarisation n'est prévue en tête de maçonnerie, alors une bande de désolidarisation est fixée sur le sol avant le montage de la maçonnerie. Cette bande doit être conforme au DTU 20.1 et avoir la même largeur que la maçonnerie. Son épaisseur est d'au minimum : 5mm si une bande est prévue en pied et en tête, et 10mm si une seule bande est prévue en pied.

Un mortier à base de liant hydraulique (dosé à 600kg/m3 de ciment) est demandé dans le cas où la maçonnerie repose au niveau du sol fini. Un mortier terre peut être utilisé pour ce premier lit dans le cas où la maçonnerie repose sur un élément de soubassement insensible à l'eau de plus de 2 cm de haut par rapport au niveau du sol fini. Celui-ci sera préférentiellement réalisé par un relevé béton, des dispositions de maçonneries de petits éléments telles que briques cuites, blocs béton, pierres ou une lisse basse (en bois de classe 3 ou supérieure doublées d'une membrane étanche) sont également possible dès lors qu'elles présentent une rupture de capillarité équivalente.

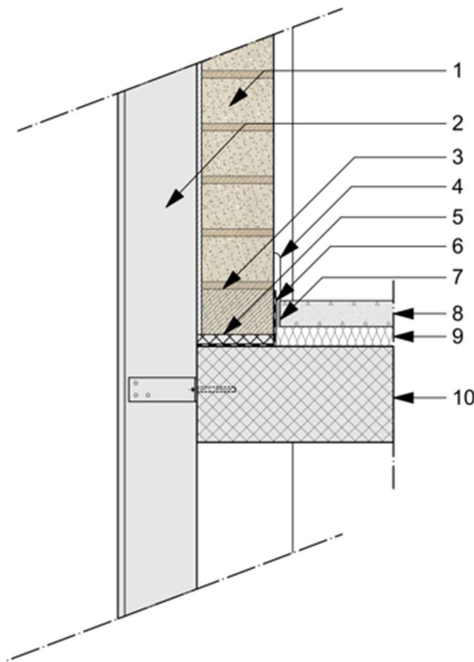
En cas de chape flottante, le premier lit sera en BTCS. Une remontée d'étanchéité devra être mise en place, de 2 cm au-dessus du sol fini au minimum.



1. ***Maçonnerie BTC (cas A)***
2. ***Complexe de mur extérieur***
3. ***Éventuellement BTCS si une protection renforcée à l'humidité est recherchée***
4. ***Mortier sable-ciment (600 kg/m3 de ciment) h : 2 cm min.***
5. ***Plinthe***
6. ***Plancher béton armé ou bois***

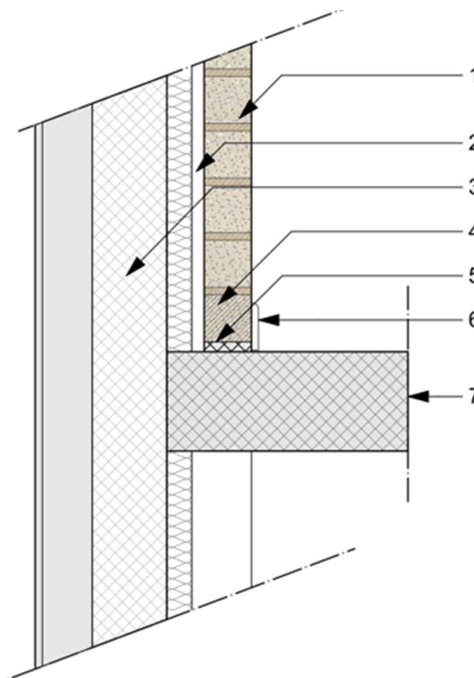
Fig. 14 : Exemple de jonction au niveau du plancher (cas A)

MC



1. ***Maçonnerie BTC (cas A)***
2. ***Complexe de mur extérieur***
3. ***BTCS pour une protection renforcée à l'humidité***
4. ***Plinthe***
5. ***Mortier sable-ciment (600 kg/m3 de ciment) h : 2 cm min.***
6. ***Barrière d'étanchéité dépassant au minimum de 2 cm au-dessus du sol fini***
7. ***Bande de désolidarisation***
8. ***Chape flottante sur isolant***
9. ***Isolation***
10. ***Plancher béton armé ou bois***

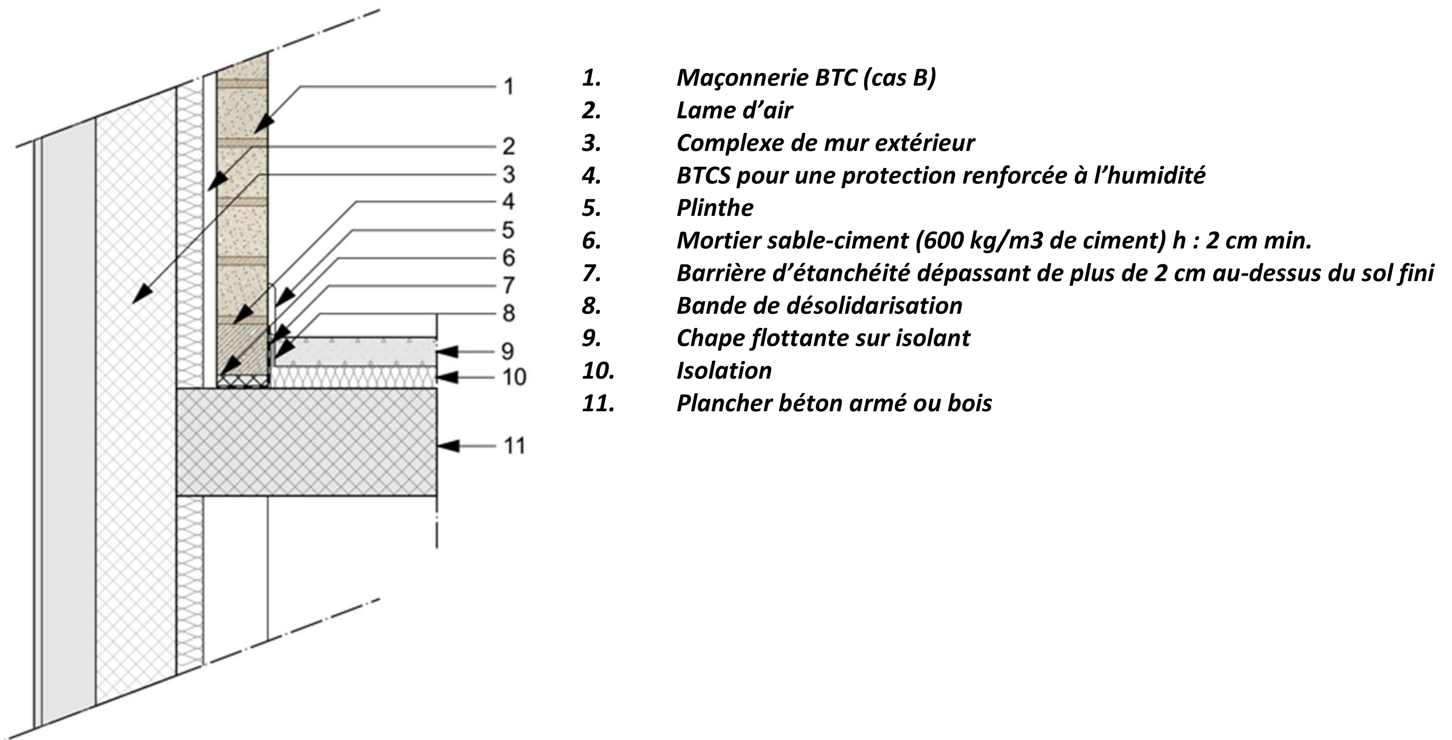
Fig. 15 : Exemple de jonction au niveau du plancher avec chape flottante (cas A)



1. ***Maçonnerie BTC (cas B)***
2. ***Lame d'air ventilée ou non / si nécessaire partiellement comblée d'un isolant***
3. ***Complexe de mur extérieur***
4. ***Éventuellement BTCS si une protection renforcée à l'humidité est recherchée***
5. ***Mortier sable-ciment (600 kg/m3 de ciment) h : 2 cm min.***
6. ***Plinthe***
7. ***Plancher béton armé ou bois***

Fig. 16 : Exemple de jonction au niveau du plancher (cas B)

MC



1. *Maçonnerie BTC (cas B)*
2. *Lame d'air*
3. *Complexe de mur extérieur*
4. *BTCS pour une protection renforcée à l'humidité*
5. *Plinthe*
6. *Mortier sable-ciment (600 kg/m3 de ciment) h : 2 cm min.*
7. *Barrière d'étanchéité dépassant de plus de 2 cm au-dessus du sol fini*
8. *Bande de désolidarisation*
9. *Chape flottante sur isolant*
10. *Isolation*
11. *Plancher béton armé ou bois*

Fig. 17 : Exemple de jonction au niveau du plancher avec chape flottante (cas B)

MC

4.3.3. Jonction haute

En tête de mur, le remplissage en maçonnerie de BTC doit être désolidarisé de la structure primaire par une bande de désolidarisation d'une épaisseur minimum de 10 mm si cette bande n'a pas été prévue en pied. L'espace restant entre la maçonnerie et la bande de désolidarisation doit être le plus réduit possible. Le bourrage de cet espace est réalisé avec le mortier ayant servi au hourdage des BTC.

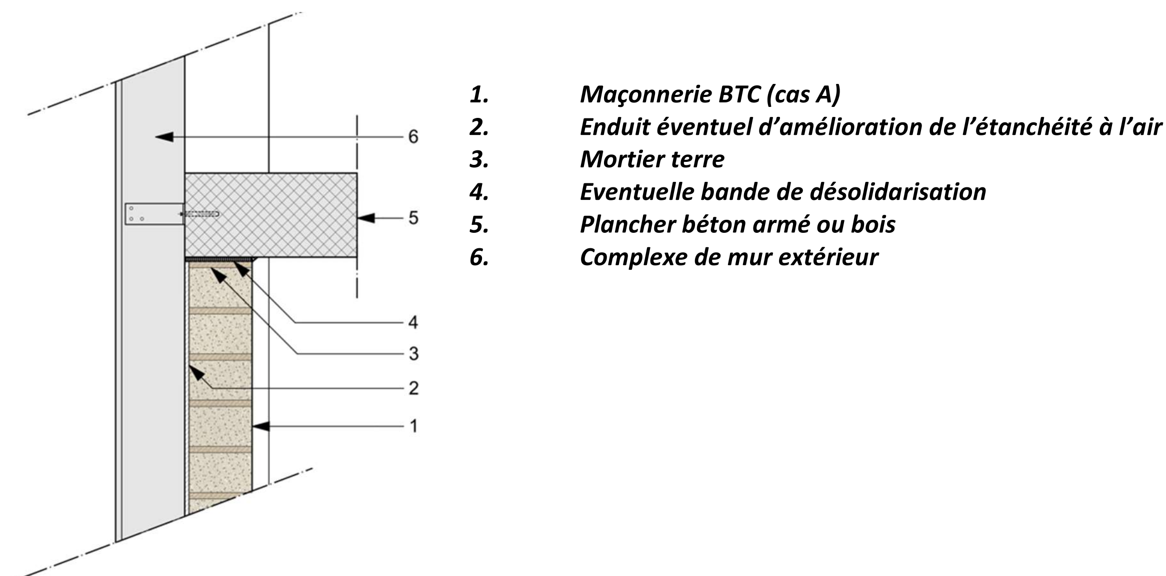


Fig. 18 : Principe général de liaison haute (cas A)

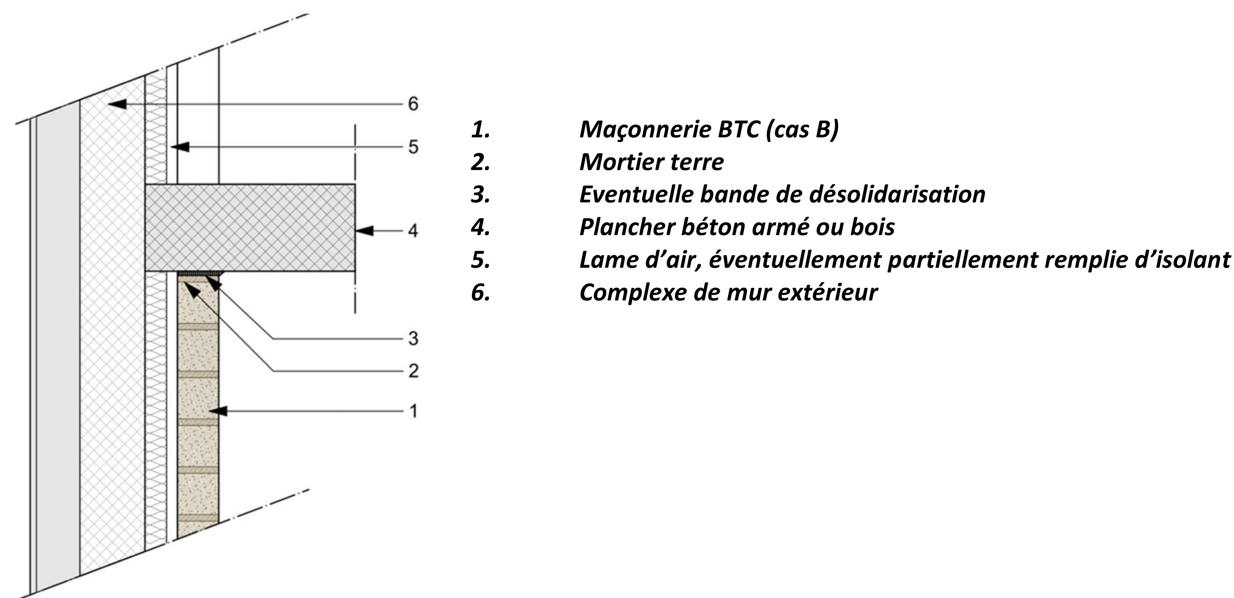


Fig. 19 : Principe générale de liaison haute (cas B)

MC

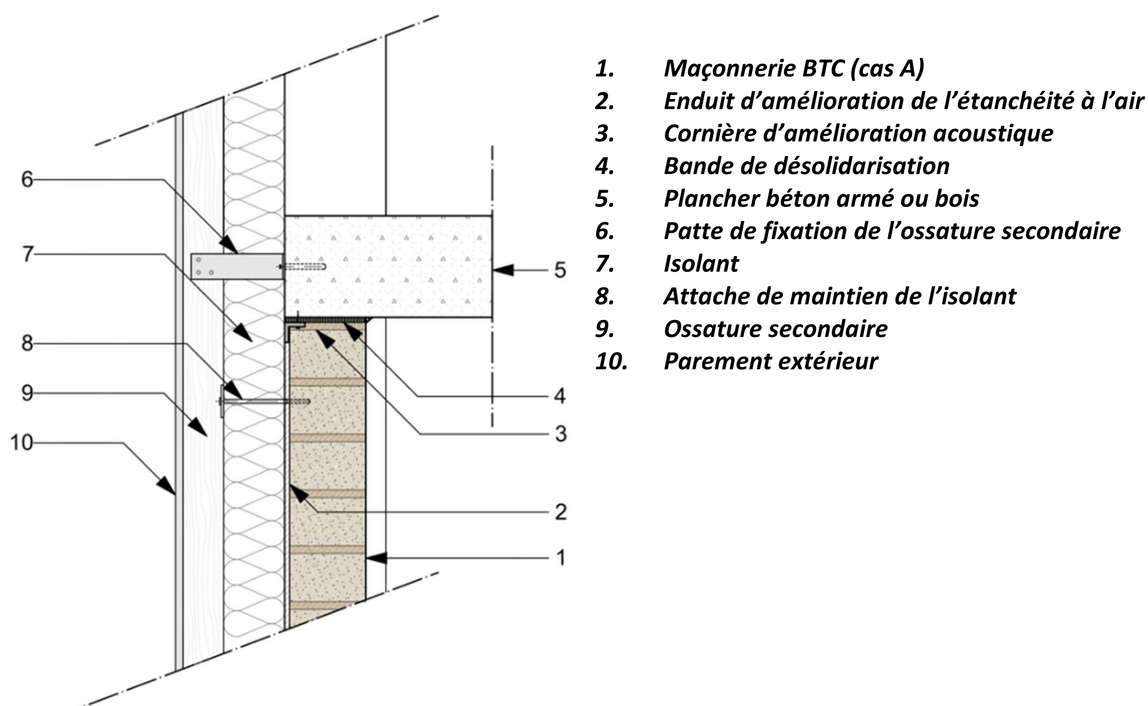


Fig. 20 : Exemple de liaison haute avec amélioration acoustique par cornière (cas A)

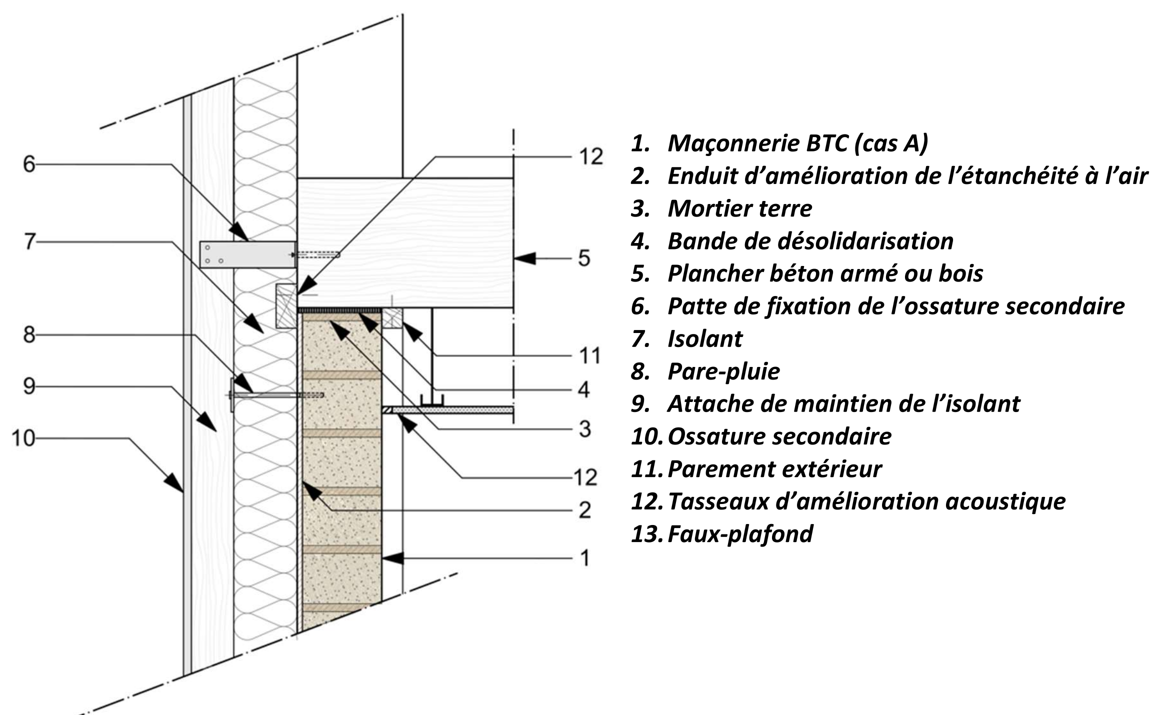


Fig. 21 : Exemple de liaison haute avec amélioration acoustique par tasseaux (cas A)

MC

4.3.4. Jonction entre remplissage en BTC et raidisseur

La maçonnerie BTC est encadrée par des raidisseurs. Ceux-ci peuvent être :

- des poteaux de la structure porteuse ;
- des ossatures secondaires en bois ou béton fixées en pied et en tête.

La jonction latérale avec un poteau ou un raidisseur peut être réalisée de deux manières :

a/ Système linéaire avec profil du poteau

Cette solution est recommandée dans le cas A lorsque des performances acoustiques élevées de la façade sont attendues. Elle permet aussi des déformations dans le plan de la structure porteuse plus importante (cf. A.4.1).

Les poteaux et raidisseurs doivent un profil formant un U en section destiné à recevoir les blocs maçonnés. Ce profil en U peut être obtenu :

- par la réalisation d'une gorge, de l'épaisseur de la maçonnerie en BTC, en réservation dans les poteaux ;
- par l'assemblage d'éléments verticaux rapportés des deux côtés de l'ossature primaire :
    - En bois : pièces horizontales en contact direct de l'ossature primaire ou moisant le mur
    - Métallique – plat, cornières en L, U par exemple ;
- par une hybridation des deux systèmes : réalisation dans l'ossature primaire d'une feuillure en L, recevant les BTC, et fixation mécanique d'une pièce verticale assemblée à l'ossature, maintenant la face libre des BTC, et fermant ainsi le profil en U.

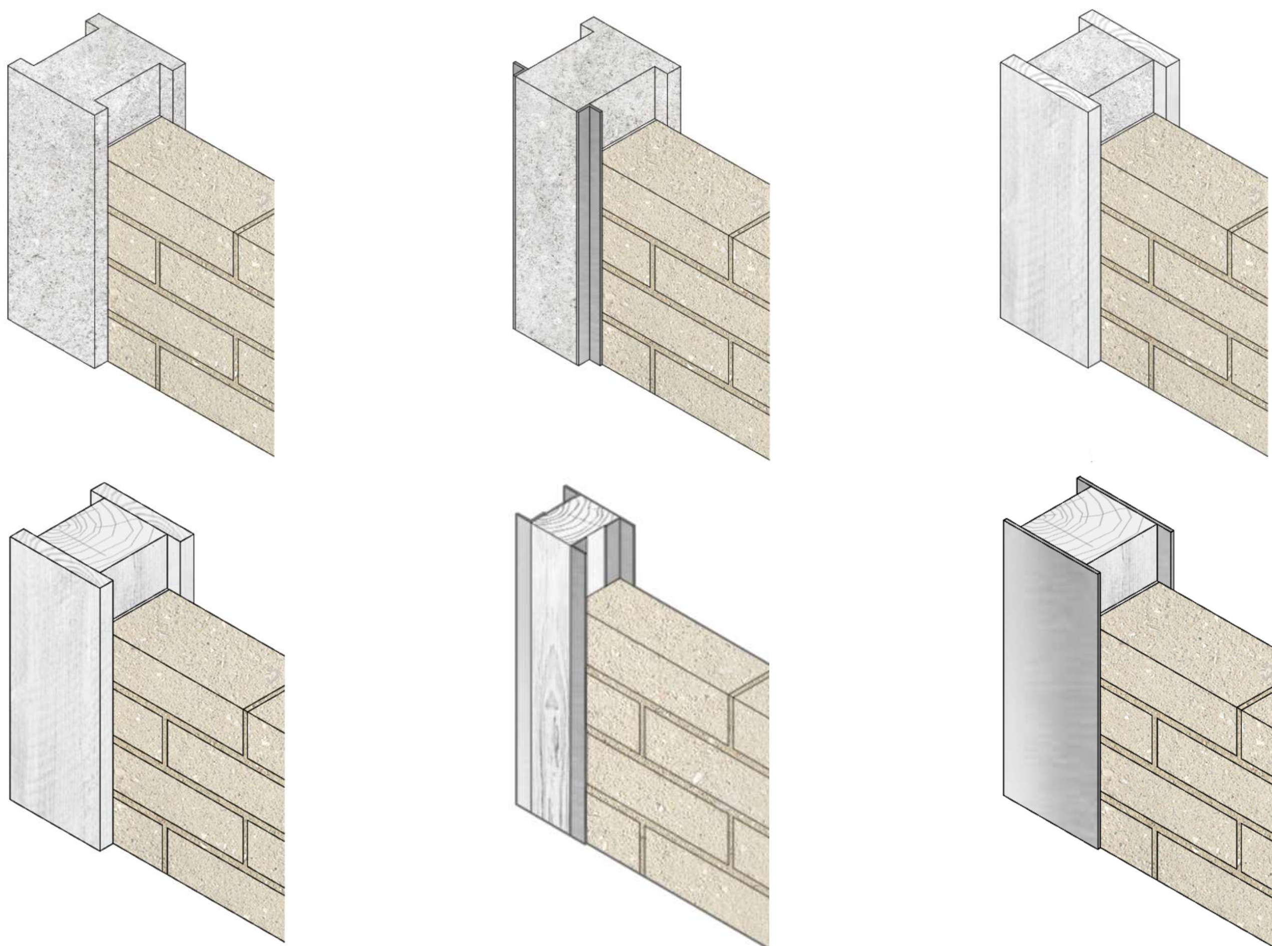


Fig. 22: Exemples de liaisons linéaires avec profil en gorge, feuillure ou assemblage

MC

Dans le cas A, la mise en œuvre de bande de joints mousse pré-comprimée et de mastic est nécessaire pour assurer l'étanchéité à l'air et l'acoustique de la façade.

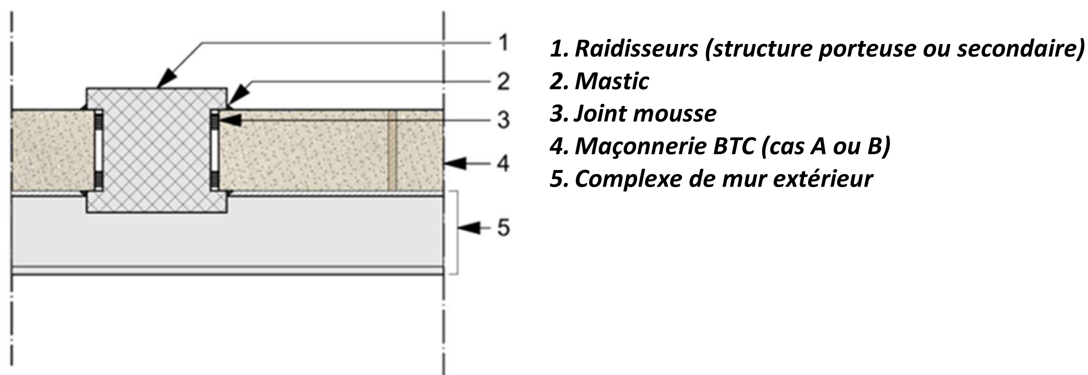


Fig. 23 : Exemple de détail en plan de la liaison entre maçonnerie et poteau d'ossature avec joint mousse (cas A ou B)

b/ Attaches ponctuelles

La liaison de la maçonnerie avec la structure porteuse et / ou les raidisseurs peut être assurée par des attaches en acier non corrodable de type SPB ou SPV ou SP21 ou SP28 de Ancon ou équivalent (longueur minimale : 125mm) disposées dans l'épaisseur des joints horizontaux du remplissage et à distance égale des deux faces de la maçonnerie (cf. A.2.4). Ces attaches sont soit fixées directement aux raidisseurs (SPB et SPV) soit fixées par l'intermédiaire de rail (SP21 et SP28). Le système de fixation directe aux raidisseurs (SPB et SPV) n'est pas autorisé dans le cas A avec ossature bois porteuse.

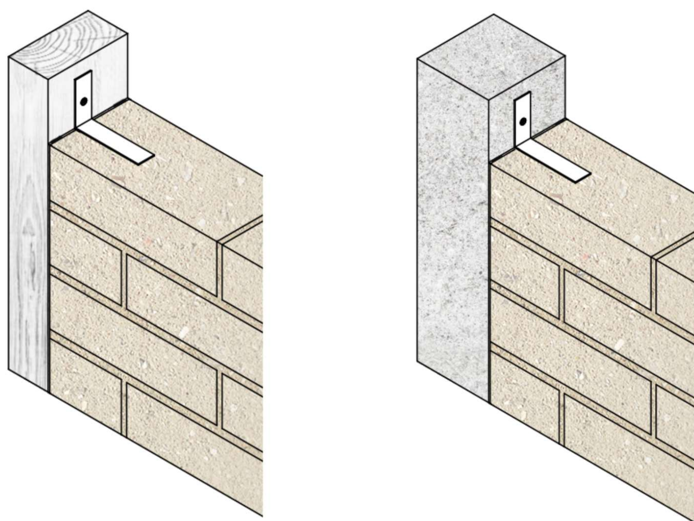


Fig. 24 : Principe de raidisseur bois (cas B uniquement) ou béton (cas A ou B) avec pattes de scellement de type SPB et SPV

Les mesures réalisées selon la NF EN 845-7 sur les attaches SPV 125 de Ancon ont permis d'estimer leur résistance moyenne au cisaillement en association avec la maçonnerie Cycle Terre à 98 daN dans le cas défavorable d'une maçonnerie de 95mm d'épaisseur. Cette mesure peut être étendue aux autres modèles d'attaches de la gamme SP de Ancon (de longueur 125mm).

Ces attaches de liaisons peuvent, de manière sécuritaire, être positionnées un rang de BTC sur 2 (cas A) (cf. §B.1.1). Dans le cas où d'autres mesures de résistance au cisaillement de ces attaches (sur des épaisseurs de maçonnerie plus importantes ou en maçonnerie stabilisée par exemple) seraient réalisées, les concepteurs pourront adapter[27] le nombre d'attaches selon la méthode

[27] Dans le cas où il est souhaité valoriser un PV d'essai au feu sur maçonnerie réalisé par Cycle Terre, il faut aligner le nombre d'attaches utilisé avec celui utilisé pour l'essai au feu.

MC

décrite au §B.1.1.

Pour le cas B, les concepteurs se réfèreront au tableau suivant :

Tableau 6 : Fréquence des attaches de liaison en fonction de la distance entre raidisseurs (cas B)

Distance entre raidisseurs	Distance maximale entre attaches
≤ 3 m	55cm, soit une attache tous les 5 lits (panneresse) ou 3 lits (sur chant)
3 < l ≤ 3,8 m	44cm, soit une attache tous les 4 lits (panneresse) ou 2 lits (sur chant)
3,8< l ≤ 5 m	33cm, soit une attache tous les 3 lits (panneresse)
> 5 m	22cm, soit une attache tous les 2 lits (panneresse)

Dans le cas où l'usage d'autres références d'attaches serait souhaité (par exemple attaches avec manchon de décollement de type PPB ou PPV ou PP21 de Ancon), celles-ci devront être conforme à la NF EN 845-1 et avoir été l'objet d'un essai à l'arrachement selon la norme NF EN 845-7 justifiant de la résistance au cisaillement des attaches dans la maçonnerie.
Les concepteurs détermineront alors la fréquence d'attaches en considérant un facteur de passage de la valeur moyenne mesurée à la valeur caractéristique de 0,7 et un coefficient de sécurité de 2,7 (conforme NF DTU 20.1) (cf. § B1.1).

Les attaches sont fixées dans un support bois ou béton (éventuellement via des rails) avec des chevilles ou vis de capacité supérieure à l'effort de cisaillement retenu pour le dimensionnement. Cette capacité des chevilles ou vis de fixation sera déterminée selon prescriptions du fabricant.

Dans le cas A, a minima une bande de mousse pré-comprimée sera utilisée à l'interface entre le raidisseur et la maçonnerie en fond de joint avec mise en œuvre de mastic en finition. En cas de performances acoustiques élevées attendues, il est conseillé de mettre en œuvre deux bandes pré-comprimées de part et d'autres des attaches.
L'étanchéité à l'air à la jonction entre la maçonnerie et le raidisseur ne pourra pas être assurée par une continuité de l'enduit.

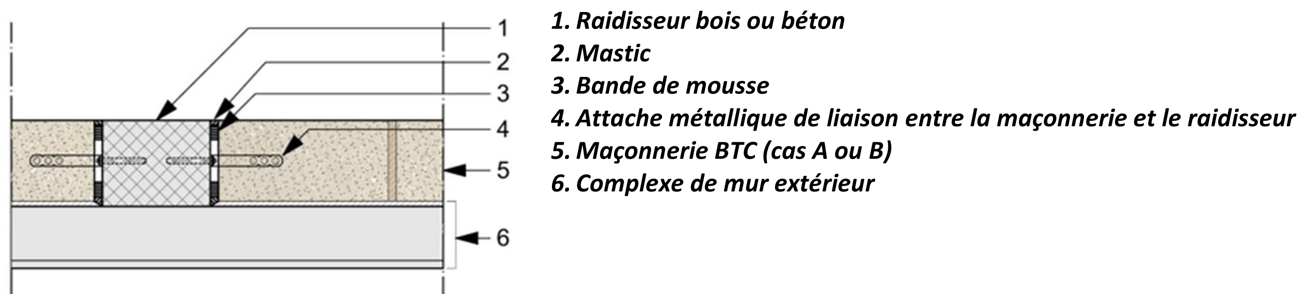


Fig. 25 : Détail en plan de la liaison entre maçonnerie et raidisseur par attaches ponctuelles (cas A ou B)

4.3.5. Angles

Dans le cas A, des poteaux d'ossature ou raidisseurs sont obligatoirement placés dans les angles.

Dans le cas B, l'angle peut être traité soit par intégration d'un raidisseur, soit par harpage de la maçonnerie avec un mur BTC perpendiculaire. Dans ce cas, le concepteur devra s'assurer que les déformations prévisibles des maçonneries de part et d'autres de l'angle sont similaires (en particulier le tassement de la maçonnerie, lié à sa hauteur et au rythme de pose).

MC

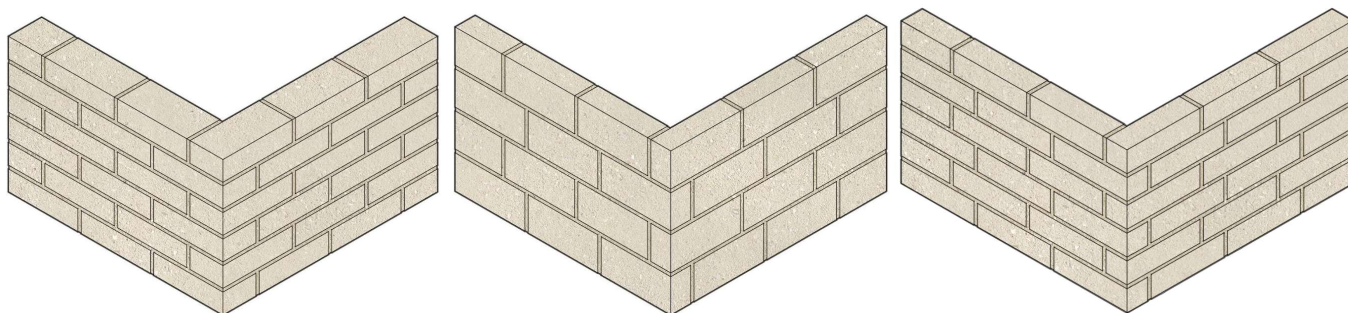


Fig. 26 : Principe d'appareillage des angles (BTC format classique en panneresse, sur chant, BTC format parement)

On rappelle que la pose de la maçonnerie avec bords libres n'est pas autorisée.

4.3.6. JONCTION AVEC DES CLOISONS OU MURS DE REFEND

Murs de refend et cloisons séparatives
Des poteaux de l'ossature primaire ou des raidisseurs sont également disposés aux jonctions avec les murs de refend (pour des raisons structurelles) et cloisons séparatives (pour limiter les transmissions acoustiques latérales).

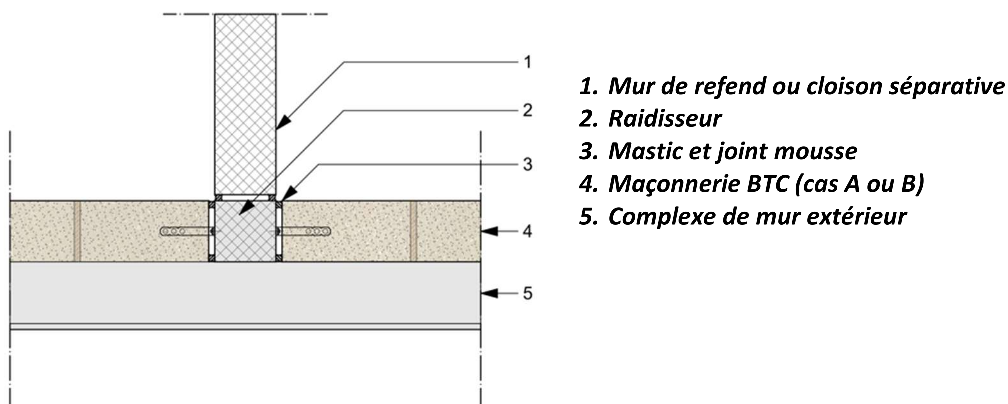


Fig. 27 : Schéma de principe de la jonction de la maçonnerie BTC avec un mur de refend ou une cloison séparative

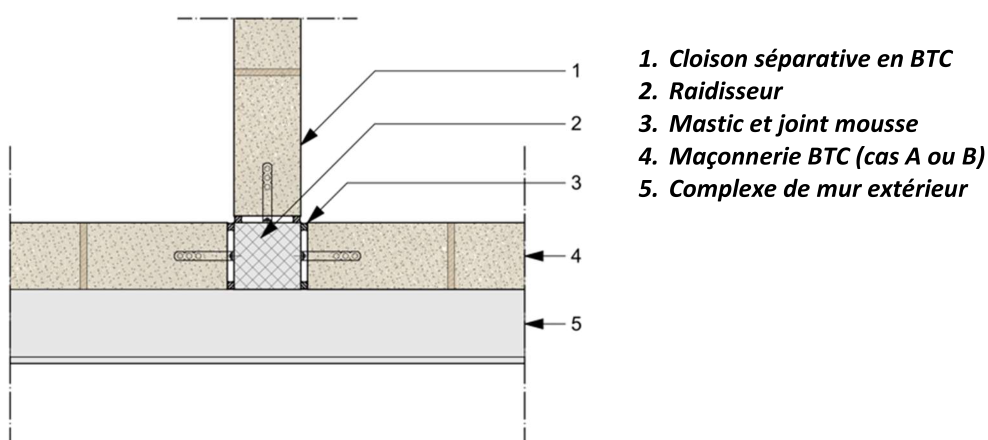


Fig. 28 : Exemple de liaison avec une cloison séparative en BTC

MC

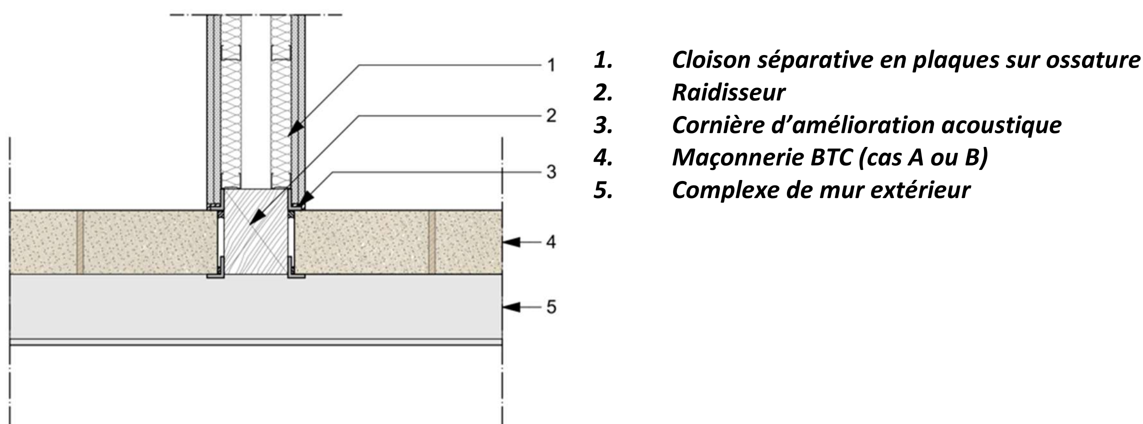


Fig. 29 : Exemple de jonction avec une cloison séparative en plaques sur ossature

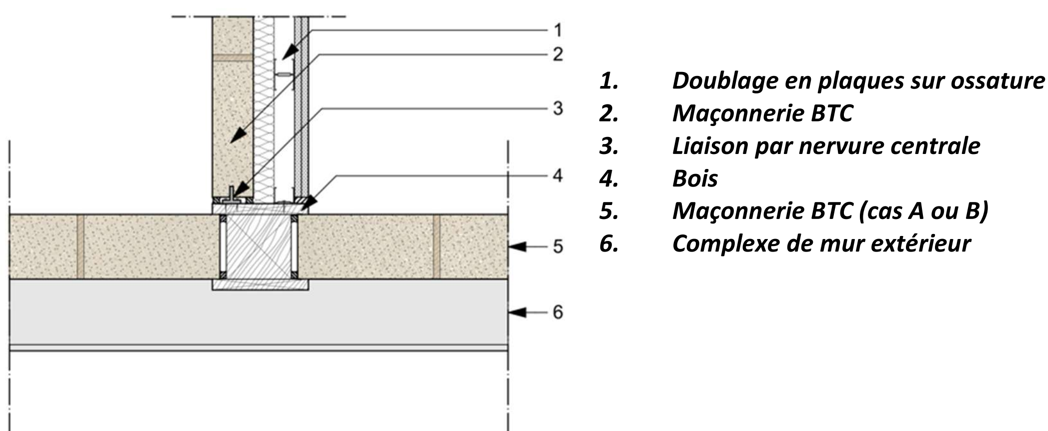


Fig. 30 : Exemple de jonction avec une cloison séparative mixte BTC / plaques sur ossature

Cloisons distributives
Les cloisons distributives en BTC pourront être reliées par harpage des assises successives avec une maçonnerie en BTC situé en remplissage de façade (cas A) ou en doublage intérieur (cas B).

Dans les autres cas, on évitera de lier mécaniquement les cloisons distributives aux murs de remplissage en BTC afin d'éviter l'apparition de défauts liés aux comportements différentiels des matériaux.

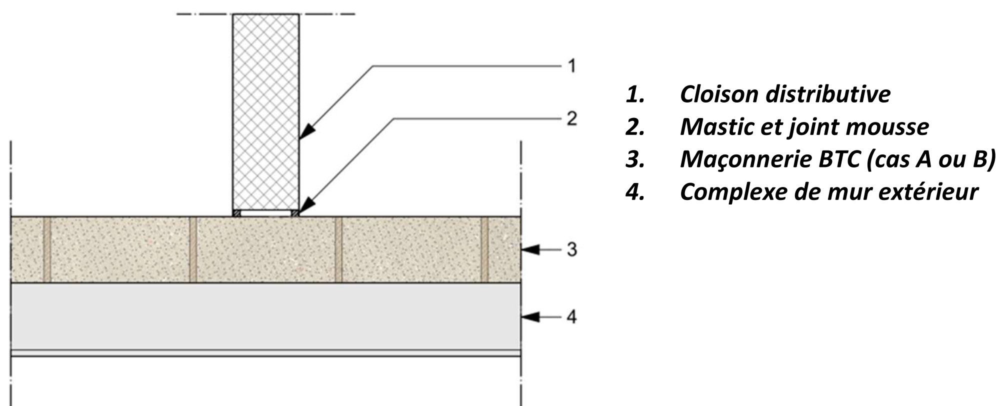


Fig. 31 : Schéma de principe en plan de la jonction avec une cloison distributive

MC

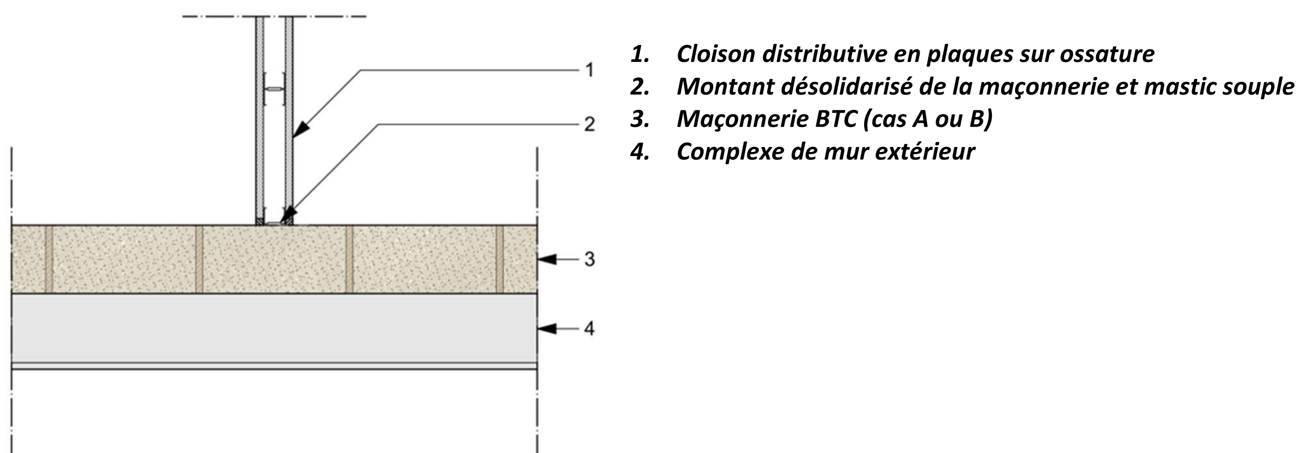


Fig. 32 : Exemple de jonction avec une cloison distributive en plaques sur ossature

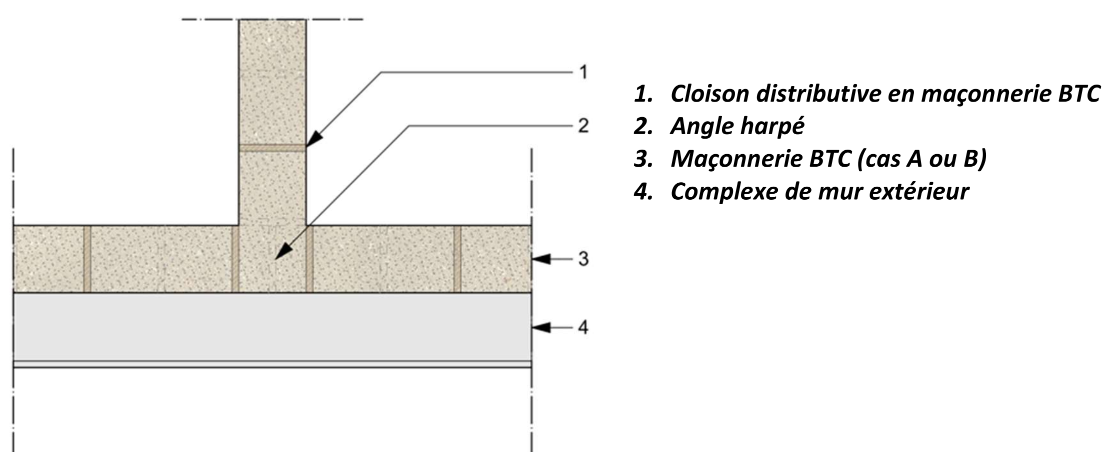


Fig. 33 : Exemple de jonction avec une cloison BTC par harpage des assises successives

4.3.7. JONCTION AVEC LES OUVERTURES

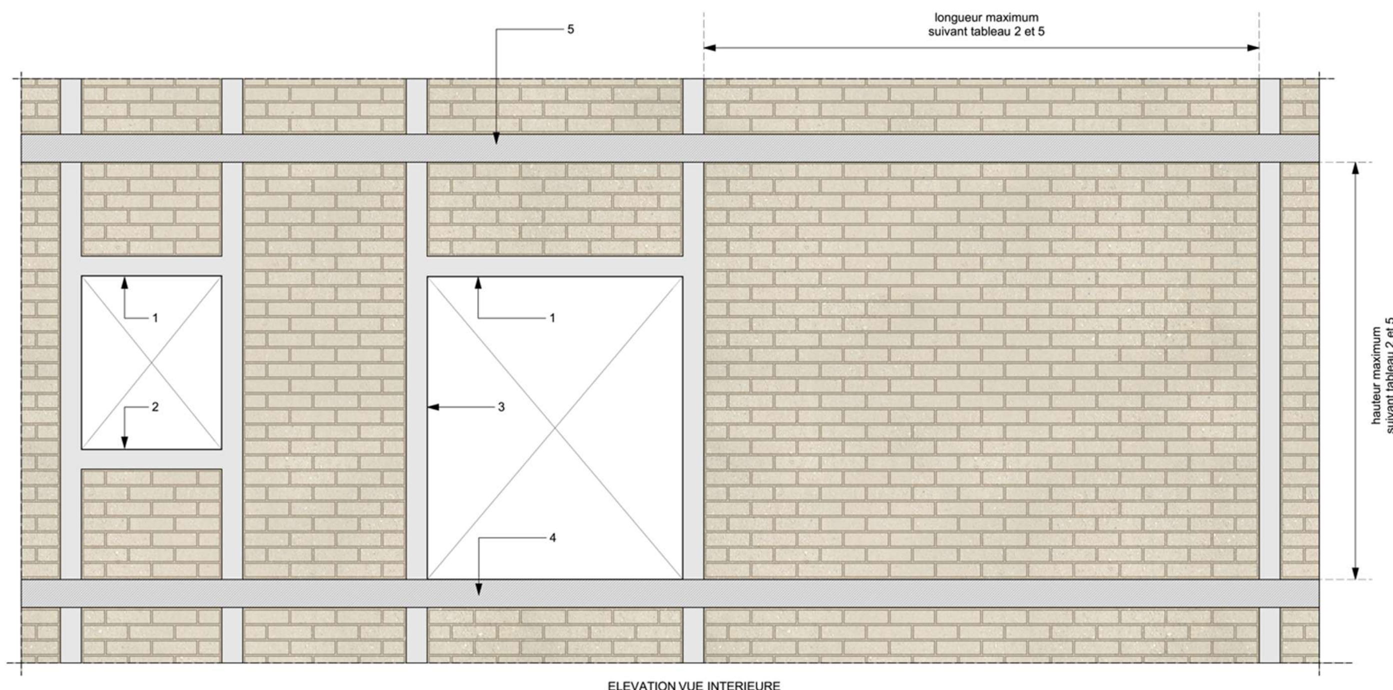
Scellements et fixations des menuiseries

Des poteaux de l'ossature primaire devront être prévus de chaque côté des ouvertures, de façon à ce que les menuiseries soient fixées dedans. Un chevêtre en béton armé ou en bois sera réalisé sous chaque ouverture disposant d'une allège. L'ancrage des cadres dormants des menuiseries sera réalisé dans les éléments d'ossature conformément aux prescriptions du fabricant. Le traitement de l'étanchéité à l'eau et à l'air sera réalisé à l'interface entre le dormant et l'élément d'ossature conformément aux prescriptions du fabricant.

Linteaux

Les linteaux sont réalisés en béton préfabriqué, en acier ou en bois. Ils sont fixés aux poteaux de l'ossature primaire ou aux raidisseurs verticaux. Leur flèche active est limitée à 1/500^{è} de sa portée.

MC

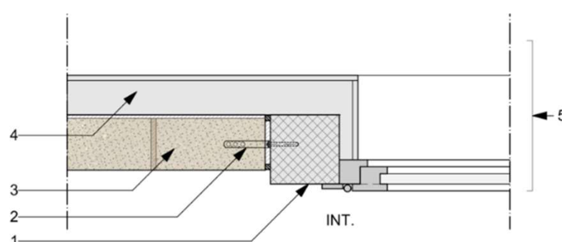


1. ***Linteau en béton ou en bois***
2. ***Appui de fenêtre en béton ou en bois***
3. ***Raidisseur en béton ou en bois***
4. ***Plancher bas***
5. ***Plancher haut***

Fig. 34 : Principe d'intégration des baies

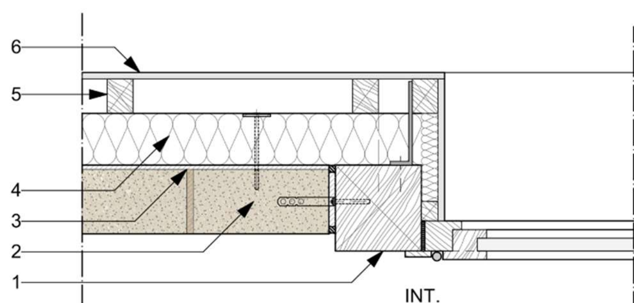
Isolation thermique extérieure autour des baies

Afin de limiter les ponts thermiques au niveau de l'encadrement de baie, un recouvrement minimal des dormants (ou du coffre de volet roulant) et de l'encadrement de la baie par l'isolant est nécessaire.



1. ***Raidisseur***
2. ***Attache métallique***
3. ***Maçonnerie BTC (cas A)***
4. ***Isolation et parement***
5. ***Menuiserie en tunnel dans l'ossature, y compris habillage isolé des tableaux de baies***

Fig. 35 : Plan de principe d'intégration de baies (cas A)



1. ***Raidisseur bois***
2. ***Maçonnerie BTC (cas A)***
3. ***Enduit terre***
4. ***Isolant***
5. ***Ossature secondaire en bois***
6. ***Parement***
7. ***Menuiserie en tunnel dans l'ossature, y compris habillage isolé des tableaux de baies***

Fig. 36 : Exemple en plan d'intégration de baie en ossature bois (cas A)

MC

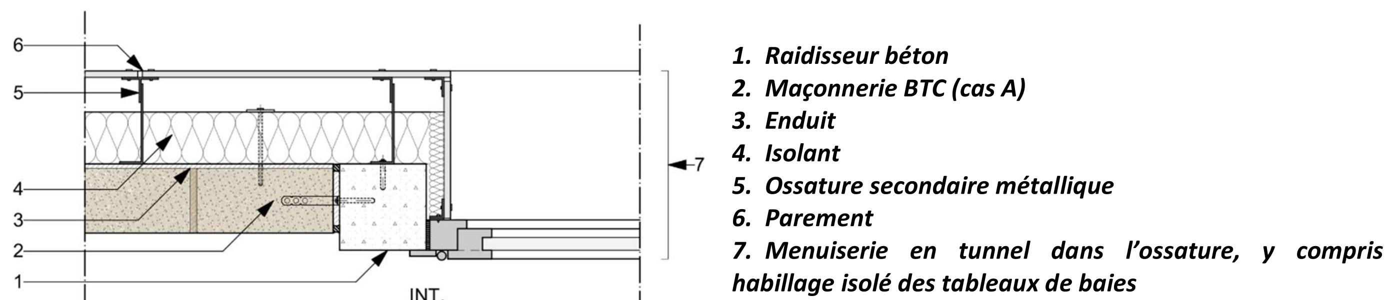


Fig. 37 : Exemple en plan d'intégration de baie en ossature béton (cas B)

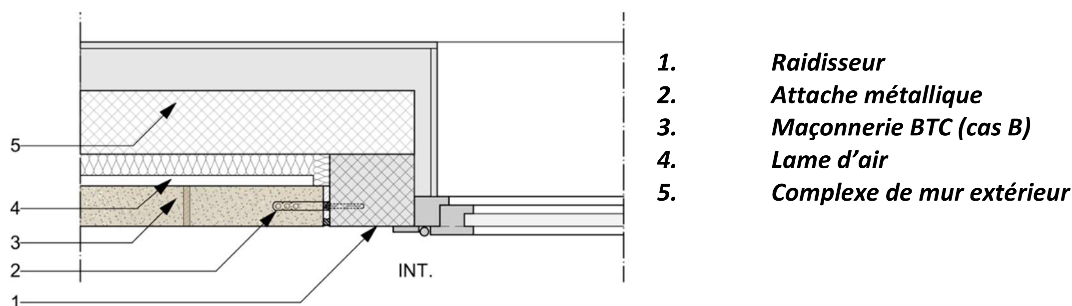


Fig. 38 : Plan de principe d'intégration de baie (cas B)

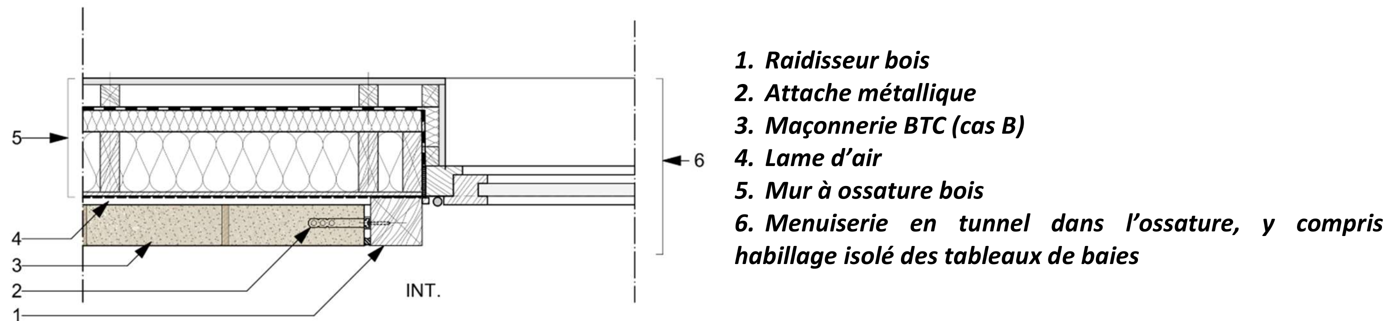


Fig. 39 : Exemple en plan d'intégration de baie en ossature bois (cas B)

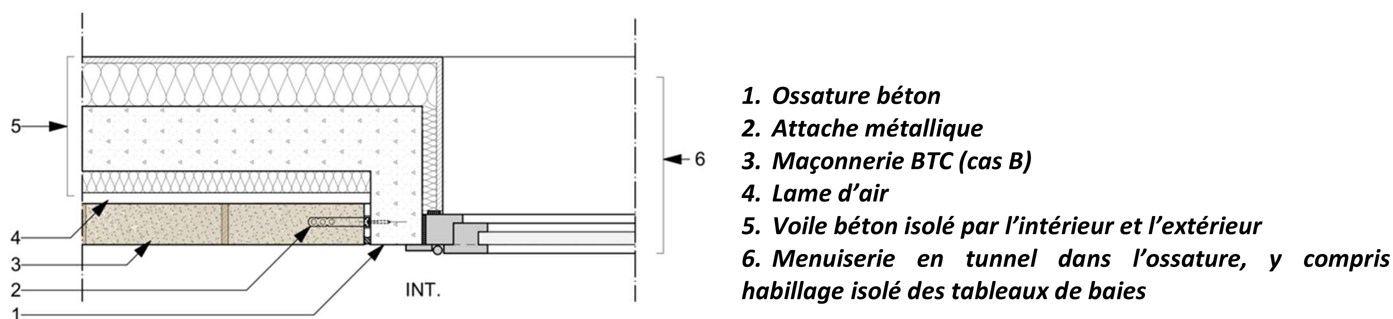


Fig. 40 : Exemple en plan d'intégration de baie en ossature béton

MC

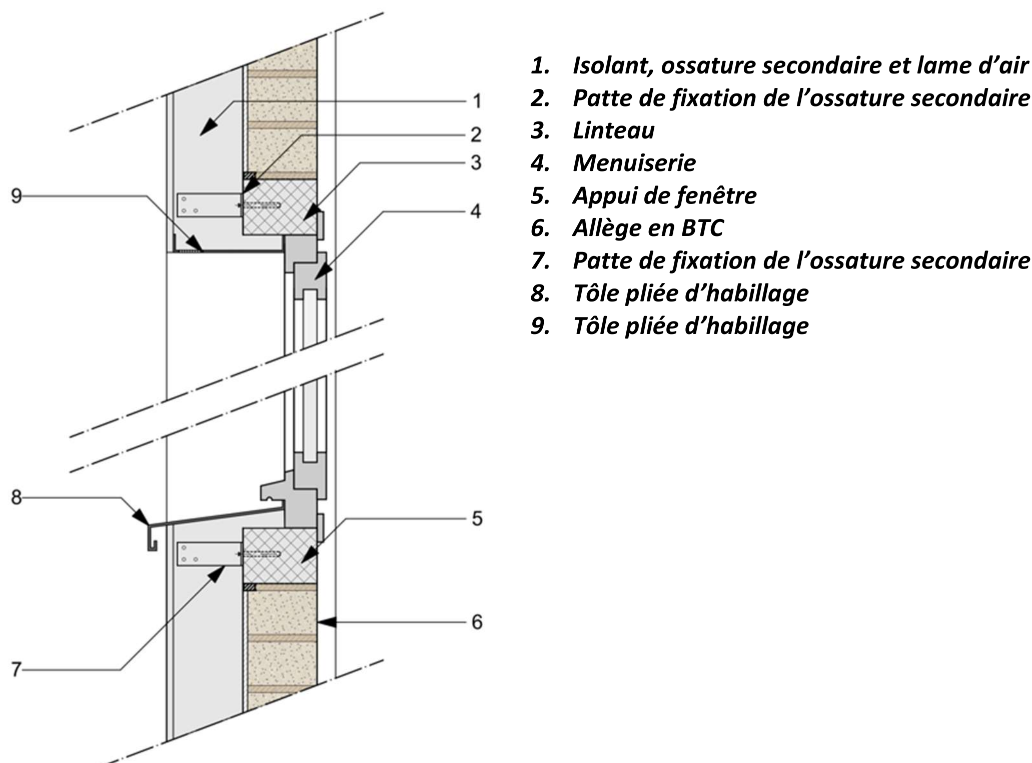


Fig. 41 : Coupe de principe d'intégration de baie (cas A)

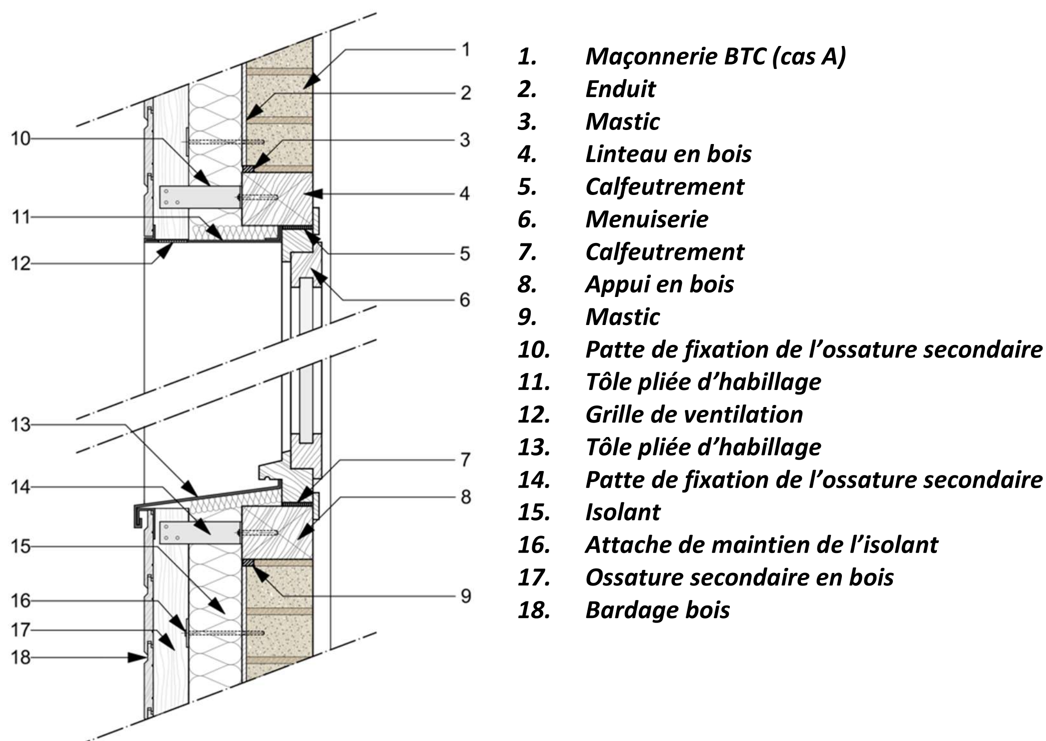
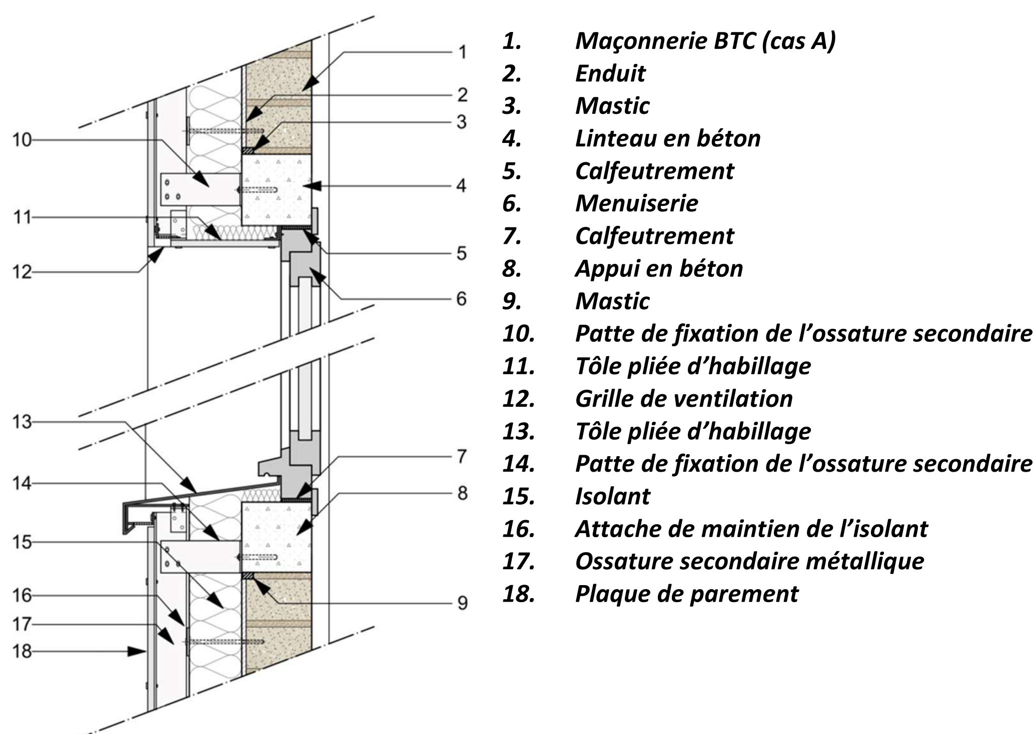


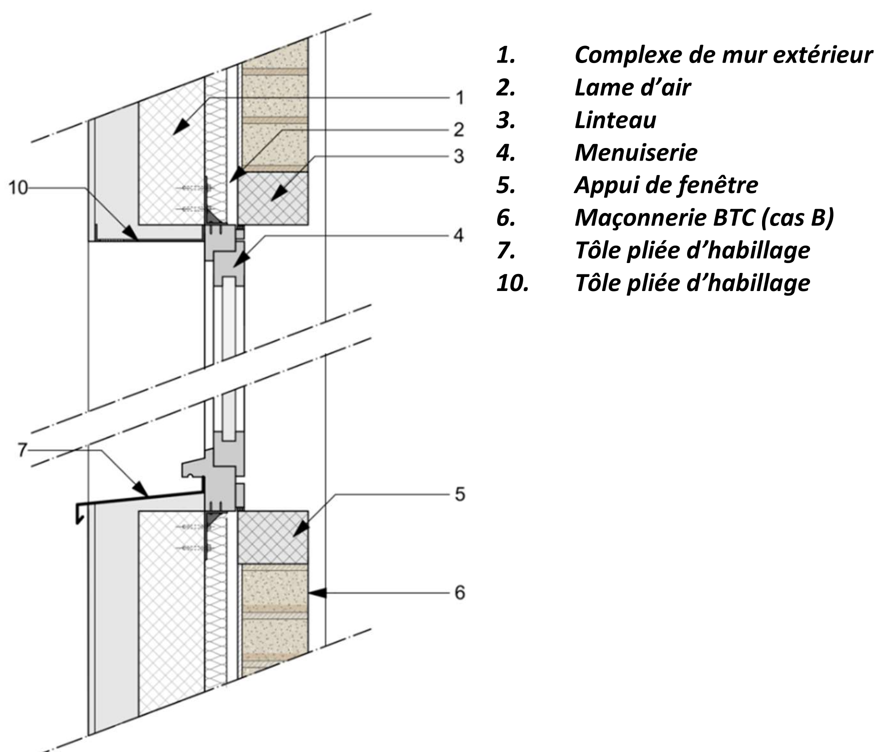
Fig. 42 : Exemple en coupe d'intégration de baie en ossature bois (cas A)

MC



1. *Maçonnerie BTC (cas A)*
2. *Enduit*
3. *Mastic*
4. *Linteau en béton*
5. *Calfeutrement*
6. *Menuiserie*
7. *Calfeutrement*
8. *Appui en béton*
9. *Mastic*
10. *Patte de fixation de l'ossature secondaire*
11. *Tôle pliée d'habillage*
12. *Grille de ventilation*
13. *Tôle pliée d'habillage*
14. *Patte de fixation de l'ossature secondaire*
15. *Isolant*
16. *Attache de maintien de l'isolant*
17. *Ossature secondaire métallique*
18. *Plaque de parement*

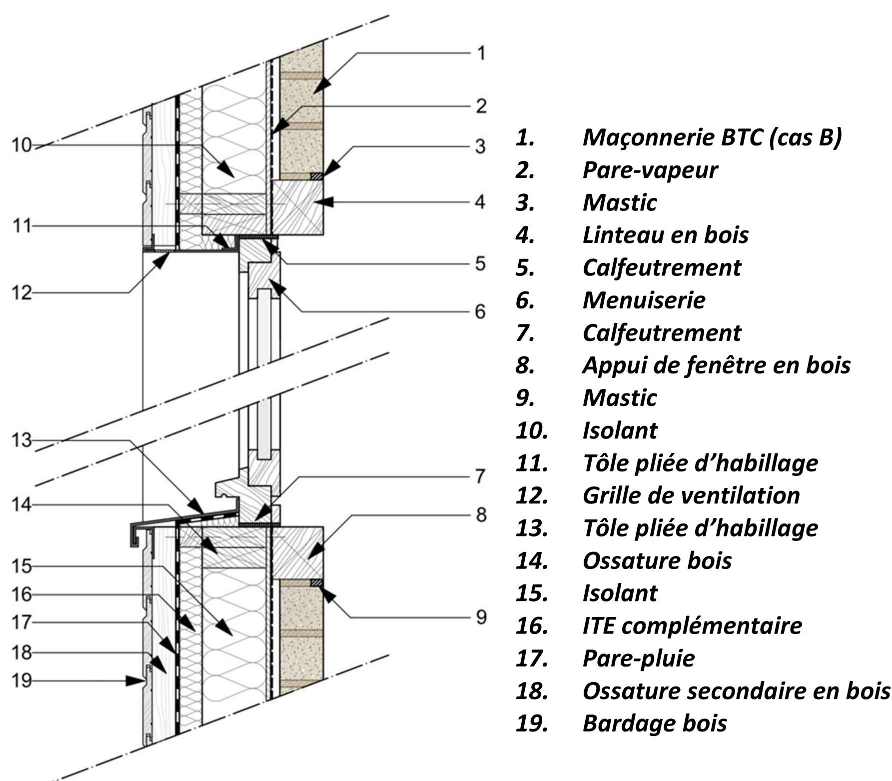
Fig. 43 : Exemple en coupe d'intégration de baie en ossature béton (cas A)



1. *Complexe de mur extérieur*
2. *Lame d'air*
3. *Linteau*
4. *Menuiserie*
5. *Appui de fenêtre*
6. *Maçonnerie BTC (cas B)*
7. *Tôle pliée d'habillage*
10. *Tôle pliée d'habillage*

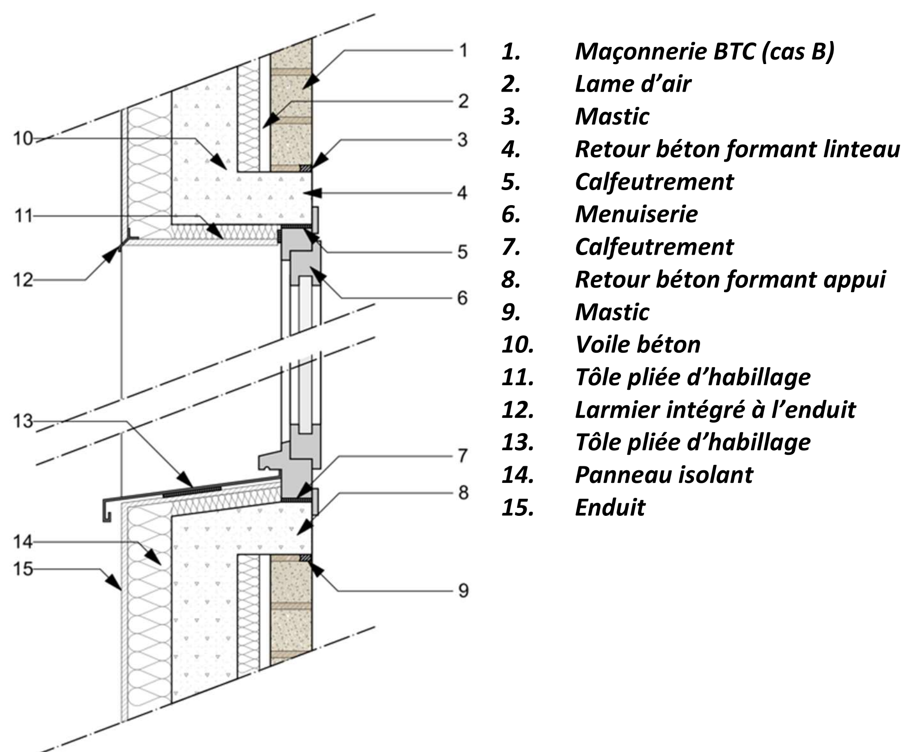
Fig. 44 : Coupe de principe d'intégration de baie (cas B)

MC



1. ***Maçonnerie BTC (cas B)***
2. ***Pare-vapeur***
3. ***Mastic***
4. ***Linteau en bois***
5. ***Calfeutrement***
6. ***Menuiserie***
7. ***Calfeutrement***
8. ***Appui de fenêtre en bois***
9. ***Mastic***
10. ***Isolant***
11. ***Tôle pliée d'habillage***
12. ***Grille de ventilation***
13. ***Tôle pliée d'habillage***
14. ***Ossature bois***
15. ***Isolant***
16. ***ITE complémentaire***
17. ***Pare-pluie***
18. ***Ossature secondaire en bois***
19. ***Bardage bois***

Fig. 45 : Exemple en coupe d'intégration de baie en ossature bois (cas B)



1. ***Maçonnerie BTC (cas B)***
2. ***Lame d'air***
3. ***Mastic***
4. ***Retour béton formant linteau***
5. ***Calfeutrement***
6. ***Menuiserie***
7. ***Calfeutrement***
8. ***Retour béton formant appui***
9. ***Mastic***
10. ***Voile béton***
11. ***Tôle pliée d'habillage***
12. ***Larmier intégré à l'enduit***
13. ***Tôle pliée d'habillage***
14. ***Panneau isolant***
15. ***Enduit***

Fig. 46 : Exemple en coupe d'intégration de baie en ossature béton (cas B)

MC

4.3.8. Pièces humides

Ce paragraphe concerne les locaux classés EB ou EB+P au sens du document « Classement des locaux en fonction de l'exposition à l'humidité des parois » (e-cahier CSTB 3567 – mai 2006). L'utilisation du procédé pour des locaux classés EB+ collectifs et EC n'est pas visée par la présente ATEx.

La ventilation des locaux chauffés devra garantir que le taux d'humidité relative moyen journalier prévisible ne dépasse pas 80% pendant plus de sept jours d'affilée[28].

La maçonnerie BTC est autorisée en local EB sous réserve d'utiliser des BTC(S) de type Rc4 (cf. A.2.1.1) et en local EB+P sous réserve d'utiliser des BTCS et du mortier stabilisé (Cycle Terre ou M2,5 ou M5 de recette selon EC6). La maçonnerie BTC(S) est autorisée uniquement sur les parois non exposées à des projections d'eau régulières de type ruissellement.

Dans le cas où la maçonnerie débute au niveau du sol fini, alors le premier lit de mortier est dosé à 600 kg/m^3 de ciment et la première assise est réalisée en BTCS (de classe d'application CL2 au sens de la norme XP P 13-901). Cette disposition n'est pas obligatoire si la maçonnerie BTC repose sur un soubassement insensible à l'eau de plus de 10 cm. Celui-ci sera préférentiellement réalisé par un relevé béton, des dispositions de maçonneries de petits éléments telles que briques cuites, blocs béton, pierres sont également possible dès lors qu'elles présentent une rupture de capillarité équivalente.

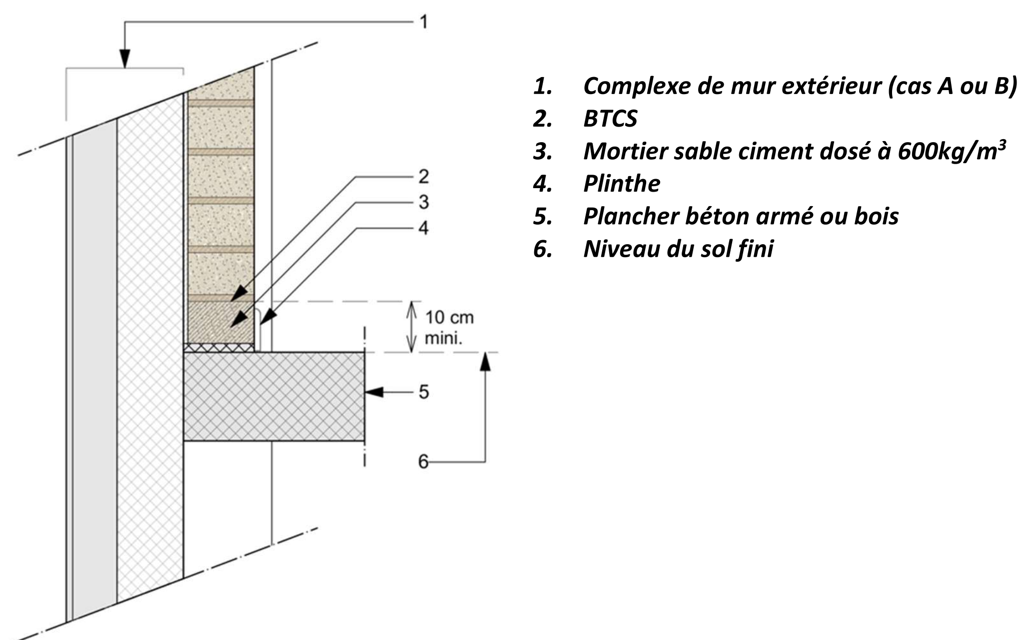
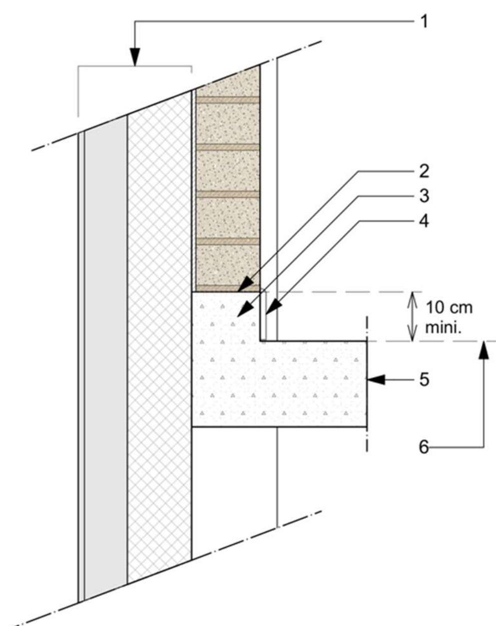


Fig. 47 : Traitement du pied de maçonnerie en local humide

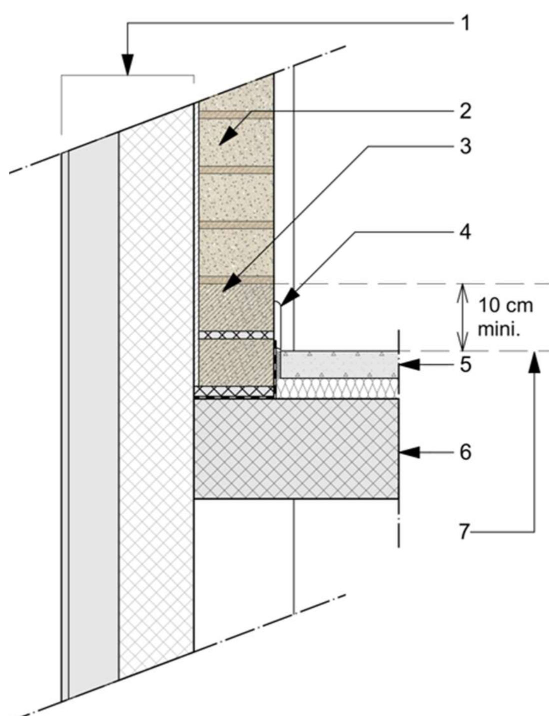
[28] Limiter la durée d'exposition à 80% d'humidité relative permet de limiter le risque que la maçonnerie atteigne sa teneur en eau d'équilibre dans ces conditions (estimée à moins de 3%) (cf. B.1 et B.2.6).

MC



1. *Complexe de mur extérieur (cas A ou B)*
2. *Mortier terre*
3. *Soubassement béton*
4. *Plinthe*
5. *Plancher béton armé*
6. *Niveau du sol fini*

Fig. 48 : Exemple de traitement de pied de maçonnerie en local humide par soubassement béton



1. *Complexe de mur extérieur (cas A ou B)*
2. *Maçonnerie BTC (cas A ou B)*
3. *Maçonnerie stabilisée (BTCS et mortier stabilisé)*
4. *Plinthe*
5. *Chape flottante*
6. *Plancher béton armé ou bois*
7. *Niveau du sol fini*

Fig. 49 : Exemple de traitement du pied de maçonnerie en local humide avec chape flottante

MC

4.3.9. Doublage intérieur

Si un doublage est mis en œuvre, il devra être porté par une ossature désolidarisée de la maçonnerie BTC. L'ossature du doublage sera fixée mécaniquement à l'ossature primaire du bâtiment.

Le doublage n'est pas rempli d'isolant. L'utilisation d'un matériau étanche aux transferts d'humidité est proscrite. Ceci afin d'éviter les problèmes de condensations pouvant entraîner des pathologies liées à la présence prolongée d'humidité.

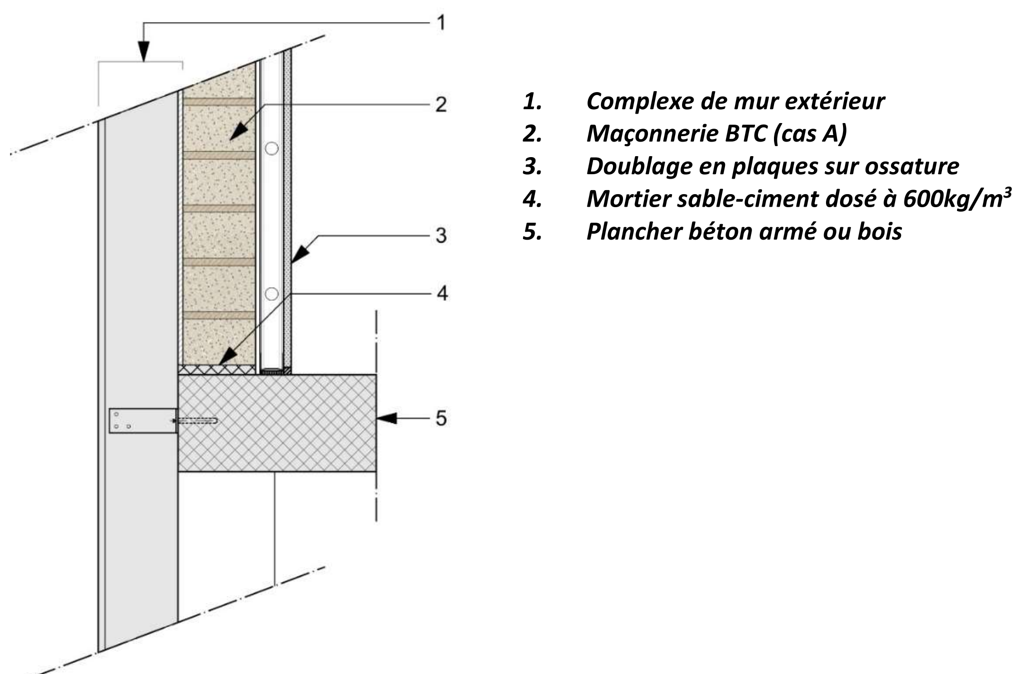


Fig. 50 : Coupe de principe de maçonnerie BTC avec doublage sur ossature

4.3.10. Implantation des réseaux

Passage des réseaux et incorporations

Lorsque la maçonnerie BTC est destinée à rester apparente, il est préférable (pour des raisons esthétiques) d'éviter les saignées au profit d'autres types de passages, en particulier en utilisant la lame d'air située entre la maçonnerie et le mur de façade (cas B).

Dans tous les cas, le passage par saignée et encastrement devra respecter la norme NF C15-100 et le mémento du NF DTU 20.13 P3 pour les canalisations électriques.

Fixation boîte électrique

Il est possible d'intégrer aux parois BTC des boîtes d'encastrement électrique pour des équipements de type interrupteur ou prise de courant. Cependant, pour une meilleure finition, on cherchera autant que possible à positionner ces équipements ailleurs que dans les murs BTC, par exemple :

- dans les soubassements béton lorsque cela est possible,
- dans les précadres de menuiserie,
- dans des parois d'une autre nature.

Lorsque ces dispositions ne sont pas possibles, le scellement de boîtes électriques se fait au plâtre classique en fond de trou. Le garnissage de finition sera quant à lui réalisé avec le mortier à BTC.

Réseaux de plomberie

L'incorporation des réseaux de plomberie (eaux) au sein du mur est proscrite. Seules les traversées ponctuelles sont permises. Les risques de pathologies dues à l'humidité peuvent avoir de graves conséquences. Tout raccord à l'intérieur du mur est proscrit,

MC

les traversées seront équipées d'un fourreau étanche sans rupture.

Réservation en traversé de parement

Des réservations au travers du parement, par exemple pour le passage des réseaux, d'une taille maximale de 200 cm² sont permises, sans mise en place de raidisseurs, de linteaux ou d'un cadre support particulier. La largeur du passage sera à adapter au format des blocs en évitant, dans la mesure du possible, d'être supérieur à 10 cm.
Les passages de câbles et tuyaux unitaires d'un diamètre maximal de 100 mm peuvent être calfeutrés au mortier.

4.3.11. FIXATION DE CHARGES NON STRUCTURELLES

Aucune fixation par clouage ou par pistoscellement ne pourra être réalisée dans la maçonnerie.
Quel que soit le type de fixation, une distance minimale aux bords de la maçonnerie supérieure à la profondeur d'ancrage devra être respectée.
Une distance minimale entre fixations devra respecter un entraxe minimum de 2 fois la profondeur d'ancrage.

La fixation d'objets de masse inférieure à 30 kg est autorisée avec des chevilles expansives plastiques ou des chevilles à expansion en caoutchouc.
La fixation d'objets de masse comprise entre 30 et 100 kg est autorisée soit avec des vis HUS3 de Hilti ou équivalent, soit avec des tiges filetées HIT-V avec scellement chimique par résine HY 170 de Hilti ou équivalent, à raison de 4 vis ou tiges minimum.

La fixation d'éléments participant à la structure du bâtiment n'est pas autorisée dans la maçonnerie.

MC

5. MISE EN ŒUVRE

5.1. PRÉPARATION DU CHANTIER ET CONDITIONS DE MISE EN ŒUVRE

5.1.1. PRÉPARATION DU CHANTIER

Réception des supports

Les maçonneries de BTC seront mises en œuvre après réalisation des fondations, des soubassements et de la structure porteuse du bâtiment. L'entreprise en charge de la pose des BTC devra réceptionner les supports et s'assurer qu'il n'existe pas d'erreur d'implantation ou de tolérance dimensionnelle sur les structures associées.

Réception des matériaux

LOTS DE BTC

Lors de la livraison, la réception est assurée par un responsable désigné de l'entreprise de pose des produits. Celui-ci s'assure de la conformité des blocs livrés par vérification de la fiche produit.
Il devra également s'assurer de l'état des lots livrés : endommagements accidentels, humidité en excès, souillures, etc. Le contrôle sera mené par une inspection visuelle.
Afin d'assurer une homogénéité des nuances de blocs, la commande des matériaux par l'entreprise sera réalisée de préférence en une seule fois. Malgré cela, de légères variations de teintes restent possibles. Afin d'éviter un défaut d'homogénéité dans le cas d'une maçonnerie apparente, il est recommandé de panacher, lors de la mise en œuvre, les blocs issus des différents lots de BTC.

MORTIER

Les mortiers sont livrés sur chantier soit en big-bags, soit en sacs de 25 kg. Le responsable doit s'assurer de la conformité des produits livrés par vérification de la fiche produit. Les contrôles effectués sont visuels, à partir d'un échantillon prélevé lors de chaque livraison : conformité aux spécifications techniques.

LIANTS

La livraison se fait en sacs sur site. Le contrôle à la livraison permettra de vérifier que :

- Les produits livrés sont sains, non altérés (humidité) et sans défaut, conformes aux normes et en cohérence avec les spécifications techniques de l'opération.
- La validité des dates limites d'utilisation prescrites par le fabricant sont respectées.

Stockage des matériaux sur chantier

Il convient de protéger les matériaux de la pluie et de l'humidité pendant toutes les phases de manutention et de stockage précédant la pose.
Il est préférable de stocker les BTC sur palettes à l'abri de la pluie et de retirer les films de conditionnement des palettes quelques jours avant la pose afin de permettre le séchage de la condensation éventuelle pouvant apparaître sous celui-ci. De plus, les BTC sont sensibles aux chocs, il est préférable de les stocker en dehors des zones de passage des engins de chantier.

Si plusieurs types de liant sont nécessaires au chantier, leur stockage sera séparé pour éviter des erreurs et mélange.

Validation d'aspect et mur prototype

Dans le cas de maçonneries BTC apparentes, la validation de la qualité de finition de la maçonnerie (calepinage, couleur, jointoiement et finition) peut s'effectuer par la réalisation, en début de chantier, d'un ou plusieurs murs prototypes permettant de définir le résultat recherché et ces critères d'acceptation.
Les prototypes sont effectués avec les matériaux et la mise en œuvre propre au marché projeté et avec une géométrie définie par la maitrise d'œuvre. Les prototypes sont réalisés sur chantier et conservés durant la durée de celui-ci. Le contrôle d'aspect durant le chantier et l'acceptation à réception se feront par comparaison avec les murs prototypes et suivant les tolérances définies au préalable.

MC

5.1.2. Conditions de mise en œuvre

Conditions climatiques
Il faut être vigilant aux conditions climatiques lors de la mise en œuvre, particulièrement en cas de temps froid ou de temps chaud et venteux.
En cas de risque de gel, la mise en œuvre de la maçonnerie est déconseillée.
Dès que la température est durablement supérieure à 30°C[29], il est préférable de préparer des petites quantités de mortier utilisables en moins de 30 minutes[30]. Une dessiccation trop rapide de la maçonnerie peut entraîner l'apparition de fissures dues à un retrait important. Quelques précautions simples peuvent également être prises : maçonner aux heures les moins chaudes, protéger le mortier et les maçonneries de la dessiccation (arrosage léger, produit de cure ou bâche, etc.).

Protection des ouvrages en cours de chantier
Le montage de la maçonnerie doit être exécuté de sorte que la stabilité soit garantie en cours de construction. Durant le chantier et jusqu'au repli de celui-ci, il faut protéger les surfaces des murs des chocs qui pourraient les endommager. Ces dommages sont le plus souvent dus à la manutention d'éléments lourds durant le chantier (coffrages, échafaudages, outils divers) ou aux manœuvres d'engins et véhicules évoluant sur le site.

Sécurité des intervenants
Les mesures de sécurité à prendre sont identiques à celles concernant la réalisation d'un ouvrage en maçonnerie classique de petits éléments. Il n'existe pas de conditions spécifiques de sécurité liées à la mise en œuvre de murs en BTC. Suivant l'importance des ouvrages à réaliser, les dispositions de sécurité peuvent être détaillées dans un Plan Particulier de Sécurité et de Protection de la Santé (PPSPS) permettant d'assurer la sécurité des intervenants pendant toute la durée du chantier.

5.2. PRÉPARATIONS POUR LA MAÇONNERIE BTC

5.2.1. Fixation des raidisseurs

Fixer les raidisseurs en tête et en pied :
- raidisseurs en métal et en bois : avec des équerres de fixation avec trous oblongs,
- raidisseurs béton : avec une armature constituée au minimum par un fer à béton axé sur le poteau.

5.2.2. Interfaces avec le sol, les raidisseurs, les murs, le plafond

Avant la pose des BTC, mettre en place l'éventuelle bande de désolidarisation au sol sur toute la largeur de la cloison finie (y compris les enduits et les plinthes). Coller les mousses type compribandes pour les liaisons avec les raidisseurs et les autres parois verticales. Le cas échéant, fixer les tasseaux ou profils métalliques au sol et sur les parois verticales, les raidisseurs et le plafond. Ces éléments pourront être utilisés comme piges pour faciliter le montage de la maçonnerie.

5.2.3. Gâchage et utilisation des mortiers

Le gâchage est effectué soit manuellement soit au moyen d'un mélangeur mécanique. Le mélange des granulats et de l'éventuel liant doit se faire à sec avant l'ajout de l'eau pour éviter des défauts d'homogénéité (cf. guide de pose). Dans le cas de mortier terre (non stabilisée), il est conseillé de préparer le mortier plusieurs heures avant le démarrage de la maçonnerie.

---

[29] De manière générale, les liants (chaux et ciment) ne doivent pas être utilisés à des températures supérieures à 35°C.

[30] Les mortiers avec liant sont sensibles aux paramètres que sont la température, l'hygrométrie, la vitesse du vent, qui agissent sur : la rhéologie du mortier et son évolution ; la vitesse de prise ; la cinétique de son durcissement et sa dessiccation. Cela influence sensiblement l'ouvrabilité mais également, à terme, la résistance mécanique du mortier, donc celle du mur.

MC

5.3. POSE DES BTC

Un guide dédié à la pose de la maçonnerie BTC est publié par Cycle Terre pour accompagner les maçons. Les principaux éléments sont repris ci-dessous, le concepteur pourra se référer au guide de pose pour plus de détails et illustrations.

5.3.1. Démarrage de la maçonnerie

Poser les 2 premières assises à sec afin de vérifier l'exactitude du calepinage. Afin de limiter la découpe de BTC tout en s'adaptant à la longueur de la cloison, il est conseillé de calepiner en tenant compte des tolérances acceptables pour les épaisseurs des joints (10 à 15 mm).

La surface d'application du mortier doit être préparée et propre. Le premier lit de mortier permet un réglage précis du premier rang de briques à l'aide de la règle et du niveau.

5.3.2. Pose des BTC en partie courante

Pour garantir une bonne adhérence entre mortier et blocs, les blocs seront humidifiés avant la pose : les BTCS seront plongés dans l'eau et immédiatement retirés et les faces des BTC (non-stabilisés) qui seront en contact avec le mortier seront légèrement humidifiés à l'aide d'une éponge ou d'une brosse large, type brosse à badigeon. Le plan de pose sera légèrement mouillé en utilisant la même technique. Le mortier est appliqué sur les faces à jointoyer en quantité adaptée.

Les BTC sont posés et mis en place sur le lit de mortier par collage en les plaquant en pression ou en les faisant translater jusqu'à avoir trouvé la position requise. Par effet de succion les BTC s'immobilisent. Il ne faut pas vibrer excessivement les BTC pour les positionner sous peine de supprimer l'adhérence entre le bloc et le mortier. Frapper ou marteler les BTC à l'aide d'une massette, d'un marteau ou même du manche de la truelle est également à proscrire, sous peine de provoquer des éclats du parement et des arêtes, ou même de de fissurer les BTC, voire de déstabiliser les maçonneries précédemment mises en œuvre.

Contrôles
Tout au long du montage, les maçons doivent contrôler :

- l'horizontalité des blocs, positionnés à l'aide d'un niveau à bulle
- l'horizontalité des assises et l'alignement des joints, grâce à des cordeaux
- la verticalité de la paroi, au fil à plomb ou au niveau à bulle. L'aplomb peut être assuré par la mise en place au préalable de piges d'angle dont la verticalité a été contrôlée. Celles-ci servent de guide de pose.
- l'épaisseur de joints, par une mesure directe. Celle-ci devra être comprise entre 10 et 15 mm d'épaisseur. Il est recommandé de tracer les hauteurs d'assises sur les piges servant de guide afin d'obtenir une régularité et une bonne répartition verticale des joints sur toute la hauteur de la cloison.
- la planéité d'ensemble au moyen d'un cordeau tendu sur 10 mètres à la surface du mur ou plus localement à l'aide d'une règle de 1 m minimum et ce dans toutes les directions du plan vertical du mur (horizontal, vertical, oblique). D'un bloc à l'autre, dans le plan vertical du mur, un outil possédant une arête rectiligne (comme une règle courte de 30 cm) permettra d'assurer un contrôle de rectitude et de vérifier qu'il n'existe pas de défauts d'alignement des blocs.

Tolérances géométriques
Le contrôle du respect des tolérances dimensionnelles ainsi que le contrôle d'aspect permettent de réceptionner les ouvrages. Les tolérances dimensionnelles des ouvrages en BTC, écarts d'implantation (alignement vertical), aplomb (verticalité), planéité (rectitude) et épaisseur sont celles qui sont appliquées aux cloisons en maçonnerie de petits éléments[31].

5.3.3. Cadence de pose et limite d'élévation quotidienne

L'élévation des maçonneries de BTC pour une journée ne doit pas dépasser 10 fois l'épaisseur du mur au risque de désolidariser les premiers rangs par de trop fortes sollicitations latérales exercées sur l'ouvrage. Lors de la reprise des travaux de maçonnerie, il convient de s'assurer que le plan de pose soit propre et dépoussiéré.

[31] NF DTU 20.13 P1-1

MC

5.3.4. MISE EN PLACE DES ATTACHES

L'installation des attaches est réalisée au fur et à mesure du montage du mur en maçonnerie. Les attaches sont fixées dans le poteau ou le raidisseur. Elles sont scellées au fur et à mesure du montage de la maçonnerie dans le mortier des joints horizontaux.

5.3.5. COUPE, TAILLE, PERÇAGE

Il est recommandé d'utiliser un ciseau de maçon et une massette pour couper les blocs aux dimensions requises. Il est également possible de réaliser les coupes à l'aide d'une meuleuse équipée d'un disque pour maçonnerie (type disque diamanté). Les BTC contiennent des graviers et cailloux qui peuvent faire dévier du plan de coupe ou provoquer des éclats importants des blocs. Le taux de perte des blocs sur chantier est de l'ordre de 5 %.

Les tailles spéciales des blocs peuvent également s'effectuer à l'aide des mêmes outils (ciseaux de maçon ou meuleuse) mais également par perçage ou abrasion. Les blocs se percent à l'aide de forets à pointe ou taillant carbure de tungstène, de type foret à béton. Le perçage s'effectue de préférence sans percussion mais par abrasion et enlèvement de matière. Pour les perçages précis, il est recommandé d'utiliser des forets pour métaux. Un trépan ou une scie cloche avec pastille au carbure de tungstène ou à lèvres diamantées peut être utilisé pour réaliser les réservations des boîtes électriques rondes.

Dans la mesure du possible, on privilégiera l'utilisation de blocs ¾ et ½ produits directement à ce format, en particulier si un appareillage très soigné des maçonneries apparentes est souhaité.

5.3.6. JOINTOIEMENT

La liaison des blocs doit être correctement faite dans les deux directions de l'appareil, par la réalisation des joints horizontaux et verticaux. Les joints verticaux doivent être bien bourrés. L'excédent de mortier doit être raclé immédiatement après la pose du bloc et si possible, les joints doivent être réalisés à frais pour une meilleure tenue (et limiter les tâches de laitance dans le cas de mortier stabilisé). Le joint en cours d'exécution doit être serré avant qu'il ne perde sa plasticité. La finition des joints peut être faite en demi-rond, en triangle ou au nu des blocs. Ils seront serrés avec un fer à joint ou à la langue de chat. Sauf indication contraire, le profil du joint en retrait aura une profondeur maximale de 5 mm.
Les joints peuvent également être légèrement creusés si le mur est destiné à être rejointoyé ultérieurement. Lorsqu'un rejointoiement doit être effectué, la profondeur du grattage du mortier non durci est d'au moins 15 mm, sans dépasser 15 % de l'épaisseur du mur mesurée à partir de la surface finie.

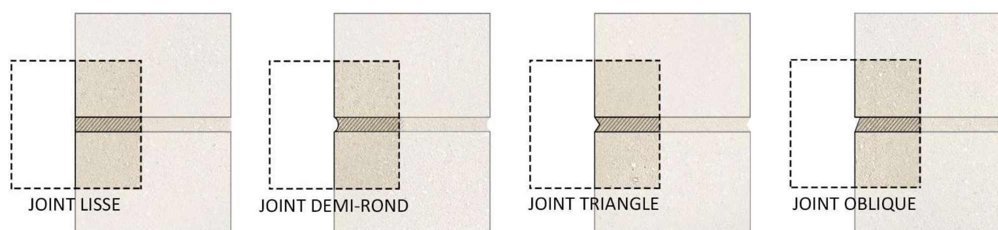


Fig. 51 : Joints autorisés

L'opération de rejointoiement est précédée d'un nettoyage de la zone entière et, si nécessaire, d'un mouillage pour obtenir la meilleure adhérence possible entre mur et mortier.

Les joints horizontaux et verticaux doivent présenter une épaisseur finie comprise entre 10 mm minimum et 15 mm maximum.

5.3.7. DERNIER RANG DE MAÇONNERIE

Avant la pose des derniers rangs de BTC, le cas échéant, la bande de désolidarisation doit être collée au plafond sur toute la largeur de la maçonnerie finie. Le dernier rang de BTC doit être maçonné en laissant un espace le plus réduit possible. Le tassement de la maçonnerie dans les jours qui suivent engendre une augmentation de cet espace et rend possible un bourrage au mortier terre (cf. B.2.3).

On rappelle que si une performance acoustique est recherchée, il est pertinent d'étudier le détail au cas par cas, et de prévoir par exemple une cornière, ou un tasseau, pour assurer l'étanchéité acoustique de l'interface.

MC

5.3.8. Protection des ouvrages en phase provisoire (Cas A)

En phase provisoire, la maçonnerie BTC doit être protégée des intempéries. Cette protection sera assurée par la mise en place d'une bâche ou de tout autre dispositif permettant une protection efficace de la maçonnerie vis-à-vis des intempéries. Cette protection sera fixée au système d'échafaudage et maintenue pendant la phase de séchage de la maçonnerie, y compris son enduit le cas échéant. Cette bâche assurera aussi une protection de la maçonnerie vis-à-vis d'une trop forte exposition au soleil et au vent. Il est rappelé que le rythme de montage du mur est limité (cf. §A.5.3.3) de façon à assurer la consolidation du mortier au fur et à mesure de la construction de l'ouvrage, et que le bourrage au mortier en tête de maçonnerie n'est réalisé qu'après tassement complet de la maçonnerie et consolidation du mortier de pose. Pendant cette phase provisoire, le remplissage de façade en BTC n'est donc pas étanche à l'air.

Par ailleurs, il est demandé le maintien de protections collectives qui ne soient pas fixées dans la maçonnerie BTC (de type échafaudage de façade) pendant cette phase provisoire de séchage de la maçonnerie. Une fois la maçonnerie sèche, elle est en mesure d'assurer la protection contre la chute (essai dit du choc de sécurité en remplissage de façade, §B.2.1).

5.4. FINITION DE LA MAÇONNERIE

Séchage, tassement

La disparition de l'humidité en excès dans le mur prend du temps. Un phénomène de tassement de la maçonnerie a lieu une fois la paroi terminée. Ce tassement vertical de la maçonnerie lors du séchage est de l'ordre de 0,3 à 0,4 %.
Il conviendra d'être attentif à ce que le tassement du mur se soit opéré et à ce que la paroi ne présente pas un taux d'humidité trop important avant la mise en œuvre des finitions. Il est fortement recommandé de respecter un délai minimum de séchage de 3 semaines avant l'application d'éventuelles finitions.

Bourrage de la partie haute

Le bourrage de l'espace entre maçonnerie et plafond sera effectué au mortier qui a servi à maçonner la paroi au minimum 2 à 3 semaines après l'étape de maçonnerie.

Préparation de la maçonnerie

Une fois la maçonnerie sèche, elle doit être balayée et/ou aspirée afin d'éliminer des grains et poussières non adhérents.
Pour uniformiser l'aspect et limiter quelques défauts visuels, le passage d'une taloche-éponge humide ou un léger égrainage de la surface de la maçonnerie avec un abrasif de type papier de verre de grain 120 peut être effectué.

Rejointoiement de la maçonnerie

L'opération de rejointoiement, le cas échéant, est précédée d'un nettoyage de la zone entière et si nécessaire, d'un mouillage pour obtenir la meilleure adhérence possible entre mur et mortier. Les joints horizontaux et verticaux doivent présenter une épaisseur finie comprise entre 10 mm minimum et 15 mm maximum.

Finition des interfaces

Une fois le tassement du mur réalisé et après séchage de l'éventuel joint de bourrage en tête de cloison, on procédera, si nécessaire, à l'application du mastic et à la fixation des cornières et tasseaux.

Fissuration de retrait

Des fissurations légères ou des microfissurations, non structurelles, dues au retrait des maçonneries de BTC lors du séchage de l'ouvrage peuvent apparaitre en partie courante du mur dans les mortiers de montage des blocs. Les tolérances d'acceptation de ces fissurations sont telles que :

- Elles ne présentent pas une largeur d'ouverture supérieure à 1mm ;
- Elles ne sont pas prolongées dans les blocs ;
- Elles ne sont pas traversantes.

Ces tolérances d'exécution peuvent être redéfinies dans le cas où un mur prototype est réalisé à cet effet (cf 5.1.1).
Il est simple de reboucher des fissurations par passage d'une truelle à joints adaptée, fer à joint plat ou demi-rond, avec humidification préalable du mortier si nécessaire. En cas de maçonnerie stabilisée, privilégier un rejointoiement et veiller à bien resserrer les joints encore frais.

MC

Fixateur, peinture et produits de finition

La personne responsable de la finition du mur se réfèrera aux fiches de pose des fixateurs, peinture ou autres produits de finition sélectionnés. Dans tous les cas, il est conseillé de réaliser un essai sur une surface d'environ 1 m² afin de vérifier la bonne compatibilité de la recette avec le support, le rendu final et les modalités de pose.

Enduit

La réalisation d'un enduit doit respecter les Règles professionnelles pour la mise en œuvre des enduits sur supports composés de terre crue acceptées par la Commission Prévention Produits mis en œuvre (C2P) de l'Agence Qualité Construction en 2012.
En particulier, l'enduit ne pourra pas être continu entre la maçonnerie BTC et les raidisseurs.

5.5. ENTRETIEN

Entretien courant

Un nettoyage des BTC est possible par brossage léger à sec, à l'éponge humide et / ou avec un abrasif de type papier de verre de grain 120.

Réparations et gestion des désordres

Avertissement : Ce document présente différentes règles liées au dimensionnement des ouvrages et à leur mise en œuvre, dont le respect garantit l'absence de malfaçons et de désordres. Néanmoins, dans un but d'information, le présent paragraphe présente les principaux désordres et leurs causes ainsi que quelques moyens d'y remédier.

Variation involontaire de la couleur du mur

En cas de variation involontaire de la couleur d'une maçonnerie en BTC, une homogénéité de couleur / surface peut être obtenue par passage d'une taloche-éponge humidifiée. En complément, pour marquer l'esthétique de la maçonnerie, il est possible de redessiner les joints à l'aide d'une truelle à joints adaptée, fer à joint plat ou demi-rond.

Fissures de retrait, épaufrures

En cas d'apparition de fissures de retrait au sein du mortier voire dans les angles des BTC, de l'eau sera appliquée sur la fissure à l'aide d'une éponge et la fissure sera rebouchée par frottement local grâce au mortier terre adjacent. Une ré-homogénéisation de la maçonnerie sera obtenue par passage d'une taloche-éponge humidifiée. En complément, pour marquer l'esthétique de la maçonnerie, il est possible de redessiner les joints à l'aide d'une truelle à joints adaptée, fer à joint plat ou demi-rond.
Dans le cas d'une maçonnerie stabilisée, il est possible de creuser le mortier fissuré et de procéder à un matage de la zone préalablement nettoyée.

Géométrie de mur non conforme

En premier lieu, il convient de s'assurer du bon fonctionnement des niveaux utilisés sur chantier. Un affaissement peut aussi être lié à un rythme de montage trop élevé du mur, ou à l'utilisation d'un mortier trop humide. Une reprise partielle ou totale du mur est conseillée. Le passage d'une éponge humide sur l'ensemble de la surface du mur après séchage de la nouvelle maçonnerie permet une homogénéisation de la couleur de la paroi.

Fissuration liée à un mouvement de la structure porteuse

Dans le cas où un mouvement non-anticipé de la structure porteuse (poteaux, raidisseurs ou poutres hautes ou basses) entraînerait une mise en charge des maçonneries et l'apparition de fissures, il est recommandé de procéder à un suivi de l'évolution de la fissuration.
En cas de stabilisation de la fissuration sans risque structurel avéré, il est possible de procéder au remplacement des BTC endommagés en travaillant les joints adjacents au ciseau de maçon, puis de maçonner des nouveaux BTC avec le même mortier terre (on notera la possibilité de réutiliser le mortier précédent dans le cas de mortier non-stabilisé). Le passage d'une éponge humide sur l'ensemble de la surface du mur après séchage de la nouvelle maçonnerie permet une homogénéisation de la couleur de la paroi.
En cas de mouvement excessif de la structure, il est recommandé de procéder à une reprise sur la structure elle-même avant de procéder au remplacement des BTC endommagés.

MC

6. COMMERCIALISATION DU PROCEDE

Les produits Cycle Terre seront commercialisés sur site ou via des plateformes de distribution. Les produits commercialisés seront accompagnés d'un guide de pose illustré à l'usage des maçons.
Par ailleurs, un service d'assistance technique téléphonique sera assuré gratuitement par la Fabrique Cycle Terre. Un service d'accompagnement sur chantier est possible (contacter Cycle terre pour plus de renseignements).

7. FORMATION DES ENTREPRISES

Les qualifications requises pour les entreprises correspondent à celles d'une entreprise de maçonnerie et de béton armé de technicité courante qui assure l'édification de murs porteurs et les travaux de gros œuvre en BTC. La qualification au sein de l'entreprise sera au minimum équivalente au niveau III (N3 - position 1 ou 2) : Compagnon professionnel, et de préférence équivalente au niveau IV (N4 - position 1 ou 2) : Chef d'équipe ou Maître ouvrier (selon la qualification de la Convention collective nationale des ouvriers employés par les entreprises du bâtiment du 8 octobre 1990.91).

L'entreprise devra justifier soit de la présence, au sein de son effectif, d'au moins une personne ayant suivi préalablement une formation certifiante relative à la maçonnerie de briques de terre crue, soit d'une expérience suffisante en maçonnerie de briques de terre crue. Elle doit dans ce cas établir une liste aussi complète que possible des chantiers qu'elle a réalisés en maçonnerie de briques de terre crue. Des attestations de bonne exécution des travaux, délivrées par la maîtrise d'ouvrage des opérations antérieures, pourront être produites pour justifier de la compétence de l'entreprise.

MC

B. JUSTIFICATIONS TECHNIQUES

1. SATISFACTION AUX LOIS ET RÈGLEMENTS EN VIGUEUR

1.1. STABILITÉ ET RÉSISTANCE MÉCANIQUE

Cas A :
La justification du dimensionnement des maçonneries est apportée par notes de calcul sur la base des essais suivants :

- Résistance moyenne à la compression des BTC selon la NF EN 772-1 : BTC et BTC stabilisé, compression sèche et humide (à 3% de teneur en eau pour BTC et 14% pour BTCS) ;
- Résistance à la compression du mortier selon la NF EN 1015-11 ;
- Résistance à la flexion sur murets selon la EN 1052-2 selon les 2 axes pour 2 formats de maçonneries non-stabilisées (épaisseur 9,5 cm et épaisseur 15 cm) et un format de maçonnerie stabilisé (épaisseur : 15 cm) ;
- Résistance au cisaillement selon la NF EN 1052-3 sur triplets maçonnés ;
- Résistance au cisaillement des attaches métalliques selon la NF EN 846-7.

L'ensemble de la démarche est détaillée dans les paragraphes suivants.

Cas B :
La justification du dimensionnement des doublages est apportée par la validation des essais aux chocs de sécurité (cf. B.2.1), par application du paragraphe 5.3 du DTU 20.13 partie 1-1 pour le dimensionnement des cloisons, c'est-à-dire que la résistance au choc de sécurité est réputée conférer une résistance satisfaisante aux pressions de vent intérieures. Pour les épaisseurs de maçonneries supérieures à 15cm, les dimensions maximales obtenues par validation des essais aux chocs ont ensuite été réduites pour tenir compte des limitations géométriques détaillées au paragraphe B.1.1.5.

Cette méthode permet de justifier du dimensionnement suivant :

Epaisseur de maçonnerie	Hauteur maximale	Longueur maximale
9,5 cm	260 cm	350 cm
15 cm	300 cm	430 cm
22 cm	400 cm	612 cm

1.1.1. RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BTC(S)

Les BTC et BTCS ont été testés à la compression selon la norme NF EN 772-1 par le CTMNC (rapports d'essai n° 2334020028/ESP200309-1/V2, 2334020028/ESP200591-1 et 2334020028/ESP200591-2, fournis en annexe) et par amàco (rapport d'essai « Influence de la quantité d'eau résiduelle dans les BTC sur leur résistance à la compression », fourni en annexe).

Tableau 7 : Synthèse des résultats d'essais à la compression sèche sur BTC(S)

	Nombre d'échantillons testés	Moyenne (MPa)
BTC (état sec)	10	6,8
BTCS (état sec)	10	5,9

MC

Par ailleurs, les mesures de résistance à la compression réalisées sur BTC (10 échantillons) à des teneurs en eau comprises entre 1,5 et 5,4%[32] permettent d'estimer la résistance des BTC à l'état humide (3% de teneur en eau) à 5,4 MPa (diminution de la résistance à la compression de 20%).

Les mesures de résistance à la compression réalisées sur BTCS (10 échantillons) à des teneurs en eau comprises entre 12,2 et 15,5%[33] permettent d'estimer la résistance des BTCS à l'état humide (14% de teneur en eau) à 3,9 MPa (diminution de la résistance à la compression de 33%).

1.1.2. RESISTANCE A LA COMPRESSION DU MORTIER

Le mortier a été testé à la compression et à la traction par le CTMNC selon la norme NF EN 1015-11. Il en ressort les résultats suivants (échantillons stabilisés à 23°C +/- 2 et 50% +/-5 d'HR, rapport d'essai n°2334020028_10 fourni en annexe) :

Tableau 8 : Synthèse des résultats d'essais à la compression et à la traction sur mortier

	Nombre d'échantillons testés	Moyenne (MPa)
Résistance à la traction	6	0,8
Résistance à la compression	12	2,2

De plus, la résistance à la compression du mortier a été mesurée à différentes teneurs en eau. Ces teneurs en eau ont été obtenues par séchage des échantillons de mortier en étuve (50°C, 20%HR), par équilibrage à l'air libre en laboratoire (20°C, 65%HR) et par confinement des échantillons en cours de séchage (20°C, HR >65%). Les teneurs en eau à l'équilibre du mortier sont inférieures à celles des BTC, ce qui s'explique par le fait que le mortier soit plus riche en sable. Elles sont d'environ 0,8% à 20% d'HR et de 1,2% pour les échantillons les plus humides. On estime que la diminution de la résistance à la compression du mortier entre sa teneur en eau de dimensionnement (20°C, HR 50%) et sa teneur en eau maximale (hors accident) est inférieure à 20% (cf. rapport *« Influence de la quantité d'eau résiduelle dans la maçonnerie BTC sur leur résistance à la compression »* d'amàco fourni en annexe).

1.1.3. RESISTANCE A LA FLEXION DE LA MAÇONNERIE

La maçonnerie a été testée à la flexion conformément à la norme NF EN 1052-2 par les laboratoires FCBA et 3SR (rapports d'essais n°403/20/154 du 22.09.2020 et n° CNRS/019/ S.Y fournis en annexe).

Les mesures ont été réalisées selon deux directions de sollicitation :

- fx1 (sollicitations parallèles au lit de pose) ;
- fx2 (sollicitations perpendiculaires au lit de pose).

La conversion entre fxi (moyenne mesurée) et fxki (valeur caractéristique) a été réalisée selon le protocole détaillé dans la norme NF EN 1052-2 (coefficient de passage de 1,5 pour 5 corps d'épreuve et traitement statistique logarithmique avec k=2,08 pour 7 corps d'épreuve). Dans le cas de la maçonnerie stabilisée, le nombre d'échantillons testés est de 3 murets pour chaque format, il est donc proposé de considérer pour les deux formats de BTCS celui le plus défavorable (BTCS classique), et de déterminer la valeur caractéristique sur cette base, en utilisant un facteur de passage de 1,5.

Tableau 9 : Synthèse des résultats d'essais à la flexion sur maçonnerie

Maçonnerie		Nombre d'échantillons testés	Moyenne (MPa)	Valeur caractéristique (MPa)
BTC Classique	Fx1	7	0,058	0,05
	Fx2	5	0,173	0,12

[32] Ces teneurs en eau découlent d'une imprégnation des BTC par humidification puis stockage en atmosphère confinée pendant 48h.

[33] Ces teneurs en eau découlent d'une immersion pendant 2h des BTCS, conformément au protocole de compression humide décrit dans l'ancienne version de la norme XP P 13-901.

MC

BTC Parement	Fx1	5	0,069	0,05
	Fx2	5	0,269	0,18
BTCS Parement et mortier stabilisé CT	Fx1	5	0,13	--
	Fx2	3	0,38	--
BTCS Classique et mortier stabilisé CT	Fx1	3	0,08	0,05
	Fx2	3	0,35	0,23

Les mesures ont été réalisées avec un mortier à teneur en eau élevée (2%). Elles sont défavorables par rapport aux cas usuels (teneur en eau du mortier inférieure à 1,4%).

Dans le cas où des mesures complémentaires seraient réalisées permettant d'améliorer les valeurs de résistance à la flexion caractéristiques de la maçonnerie, celles-ci pourront être utilisées pour le calcul de dimensionnement de la maçonnerie (cas A) selon la méthode de calcul décrite dans la NF DTU 20.1 (cf. B.1.1.5).

1.1.4. RESISTANCE AU CISAILLEMENT DE LA MAÇONNERIE

La résistance au cisaillement de la maçonnerie a été mesurée par le CTMNC selon la norme NF EN 1052-3 (rapport d'essai n°2334020028_21 fourni en annexe). La campagne a porté sur 6 échantillons (BTC format parement, mortier Cycle Terre non stabilisé), la valeur moyenne est de 0,036 MPa et la valeur caractéristique de 0,026 MPa.

1.1.5. JUSTIFICATION DU DIMENSIONNEMENT DE LA MAÇONNERIE

Cas A :
La note de calcul en annexe détaille les justifications en compression, cisaillement et flexion. Ce sont ces dernières sollicitations qui se sont avérées dimensionnantes.

Les dimensions maximales des panneaux maçonnés ont été déterminées par comparaison des moments sollicitants (déterminés en fonction des longueurs de pans maçonnés selon les méthodes de calcul proposés par l'EC6) et des moments résistants de la maçonnerie déterminées de la façon suivante (coefficient de sécurité $\gamma_m = 3$) :

$$M_{RDi} = \frac{f_{xki}}{3} \times \frac{l^2}{6}$$

Avec l : l'épaisseur de la maçonnerie

Sont ainsi justifiées les dimensions maximales présentées au paragraphe A.4.2. On rappelle que les mesures de résistance à la flexion ont été réalisées dans le cas défavorable de mortiers à teneur en eau très élevées (2%).

D'autres mesures de résistance à la flexion de la maçonnerie (effectuées selon la NF EN 1052-2) pourront permettre aux BET structure des opérations de proposer d'autres dimensions de pans maçonnés, sans toutefois dépasser les dimensions suivantes :

- Hauteur : Un élancement maximal de 20 est autorisé, dans la limite de 4m de haut, soit 3m de haut pour une maçonnerie de 15cm d'épaisseur et 4m de haut pour une maçonnerie d'épaisseur supérieure ou égale à 20cm ;
- Longueur : Une longueur maximale égale à 26 x (e + 1,5) + 1,5, avec e l'épaisseur du mur, dans la limite de 8m de long, soit 430 cm pour une maçonnerie de 15cm d'épaisseur et 612 cm pour une maçonnerie de 22cm d'épaisseur ;
- Diagonale : La longueur de la diagonale, en élévation, du pan de maçonnerie ne sera pas supérieure à 40 fois l'épaisseur du mur.

Par ailleurs, la résistance au cisaillement de la maçonnerie est suffisante pour une mise en œuvre de la maçonnerie en remplissage de façade (avec bardage supporté par une ossature secondaire elle-même fixée à l'ossature porteuse) (voir note de calcul fourni en annexe).

Cas B :
La justification du dimensionnement des doublages est apportée par la validation des essais aux chocs de sécurité (cf. B.2.1), par

MC

application du paragraphe 5.3 du DTU 20.13 partie 1-1 pour le dimensionnement des cloisons, c'est-à-dire que la résistance au choc de sécurité est réputée conférer une résistance satisfaisante aux pressions de vent intérieures.
Pour les épaisseurs de maçonneries supérieures à 15cm, les dimensions maximales obtenues par validation des essais aux chocs ont ensuite été réduites pour tenir compte des limitations géométriques détaillées ci-dessus.
Cette méthode permet de justifier du dimensionnement suivant :

Epaisseur de maçonnerie	Hauteur maximale	Longueur maximale
9,5 cm	260 cm	350 cm
15 cm	300 cm	430 cm
22 cm	400 cm	612 cm

1.1.6. Justification des attaches de liaison entre maçonnerie et raidisseurs

Les attaches SPV 125 de Ancon ont été testées au cisaillement par essai selon la NF EN 846-7 dans une maçonnerie en BTC et mortier Cycle Terre non stabilisés format parement (cas défavorable) avec une charge de précompression de (0,1 ± 0,01) N/mm² conformément à la norme (§7.3) (voir rapport d'essai n°2334020028_23 fourni en annexe). Une résistance moyenne au cisaillement de 98daN a été mesurée. Soit une valeur caractéristique retenue pour le dimensionnement de 69daN (facteur de passage de 0,7 défini par le DTU 20.1).

Le calcul est détaillé dans la note de calcul établie par le BET Vessière fournie en annexe.

La proposition d'espacement maximal entre attaches a été déterminée en considérant l'hypothèse simplificatrice (et sécuritaire) d'une maçonnerie avec deux appuis latéraux uniquement, une pression de vent intérieure de 60 daN/m² et un coefficient de passage de l'action caractéristique à l'action pondérée du vent à l'ELU de 1,5. Soit un effort linéaire à reprendre de : 60 daN/m² * 1.5*2.4m/2 = 108 daN/ml pour la maçonnerie de 240cm de long (hauteur de bâtiment inférieure à 28m) et un effort linéaire de : 40 DaN/m² * 1.5*3.3m/2 = 99 daN/ml (pour la maçonnerie de 330cm de long (hauteur de bâtiment inférieure à 10m).
.
Et suite à application d'un facteur de sécurité de 2,7 (coefficient de sécurité préconisé par l'EC6 pour les organes de liaison) :

108*0.22*2.7 = 64daN
Une attache tous les 22cm (2 rangs de BTC) suffit (cas A).
Cas B : La pression de vent intérieur considérée est de 22,4 daN/m², ce qui permet de déterminer les dimensions suivantes :

Distance maximale entre attaches	Résistance au cisaillement mesurée (mur de 2,5m de long)	Résistance au cisaillement mesurée (mur de 5,8m de long)
11cm, soit une attache par lit de mortier	11 à 21 daN	26 à 51 daN
22cm, soit une attache tous les 2 lits	22 à 32 daN	52 à 77 daN
33cm, soit une attache tous les 3 lits	33 à 45 daN	78 à 106 daN
44cm, soit une attache tous les 4 lits	46 à 57 daN	107 à 133 daN
55cm, soit une attache tous les 5 lits	58 daN et plus	134 daN et plus

La distance maximale entre raidisseurs correspondant à une valeur mesurée de 98daN est obtenue par régression linéaire à partir des valeurs du tableau précédent : 3m pour une distance maximale entre attaches de 55cm, 3,8m pour une distance maximale entre attaches de 44cm et 5m pour une distance maximale entre attaches de 33cm.

De plus, ces attaches subissent des sollicitations en traction et en compression liées au comportement hygrothermiques des matériaux négligeables (maçonnerie non exposée au rayonnement solaire direct et longueur de maçonnerie limitée). La flèche horizontale dans le plan des éléments de structure en lien avec la maçonnerie via des attaches de liaison de type SPV de Ancon ou équivalent est par ailleurs limitée à H/300 à l'ELS, avec H la hauteur d'étage, dans la limite de 5mm.

1.1.7. Justification des attaches de fixation de l'isolant dans la maçonnerie BTC

Les attaches INCO II de Etanco ont été testées à l'arrachement dans la maçonnerie BTC (Rapport d'essai n°GRE 210308-1 du 30/07/2021 fourni en annexe). Les valeurs mesurées permettent un maintien des isolants dans la maçonnerie BTC selon les préconisations usuelles des fabricants pour les matériaux de type béton de qualité inconnue ou pierre.

MC

$N_{Rd,u}$ =	**9,2**	daN
$N_{Rd,s}$ =	**6,6**	daN

1.2. SÉCURITÉ EN CAS D'INCENDIE

1.2.1. RÉACTION AU FEU

Les BTC et le mortier utilisés ne contenant pas de fibres, ils sont classés d'office M0.

1.2.2. RÉSISTANCE AU FEU

En janvier 2022, la maçonnerie BTC Cycle Terre dispose de 3 PV d'essai au feu garantissant :

- Un classement EI30 en maçonnerie d'épaisseur 9,5cm et de hauteur inférieure à 3m en ossature bois (EI15 pour des hauteurs de maçonnerie comprise entre 3 et 4m) ;
- Un classement EI45 en maçonnerie d'épaisseur 9,5cm et de hauteur inférieure à 3m en ossature béton (EI15 pour des hauteurs de maçonnerie comprise entre 3 et 4m) ;
- Un classement EI240 en maçonnerie d'épaisseur 15cm et de hauteur inférieure à 3m en ossature béton (EI30 pour des hauteurs de maçonnerie comprise entre 3 et 4m).

Contacter Cycle Terre pour connaître les éventuels PV supplémentaires obtenus par la suite.

Une performance EI45 a été mesurée pour des maçonneries en BTC de 9,5cm d'épaisseur dans une ossature porteuse en béton. D'autres mesures de EI sont en cours ou prévues, notamment pour valider la résistance au feu des maçonneries en BTC de 15cm en ossature béton et de 9,5cm en ossature bois. Se rapprocher de Cycle Terre pour connaître les performances obtenues et les détails de mise en œuvre associés.

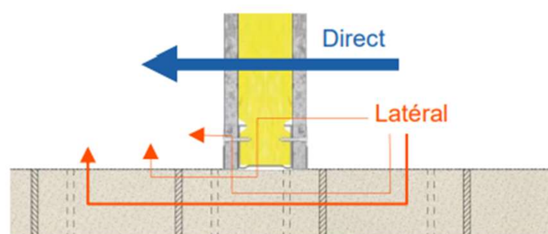
Conformément au §1.2.1 de l'IT249, la maçonnerie est susceptible de participer au calcul du C si elle bénéficie d'un classement EI supérieur ou égale à 30 (positionnement au-dessus du plancher) ou supérieur ou égal à 60 (positionnement sous le plancher, cette exigence étant ramenée au degré de résistance au feu requis pour la structure si celui-ci est inférieur à une heure).

1.3. ISOLEMENT ACOUSTIQUE

Deux mesures conformes à la norme NF EN ISO 10140 ont été réalisées sur des murs BTC de 10 cm et 30 cm d'épaisseur. A partir de ces mesures, une loi de comportement est établie par un BET acoustique pour les cloisons d'épaisseurs intermédiaires.

Des R_w (C;Ctr) de 47 (-1 ; -4) dB et 50 (-1 ; -4) ont été estimés pour des maçonneries d'épaisseur respectives 15 et 22 cm, non enduite et avec des jonctions périphériques en feuillure, ou munies de cornières ou tasseaux, ou autre système garantissant la bonne étanchéité acoustique. L'application d'un enduit permet une amélioration de cet affaiblissement.

Toutefois, cet indice d'affaiblissement acoustique ne permet pas à lui seul d'estimer l'isolement acoustique qui sera obtenu entre deux locaux. En effet, l'isolement acoustique (indice $D_{nT,A}$) est le résultat de toutes les transmissions : directes (estimées via l'affablissement R_w), mais aussi latérales et parasites. Les transmissions latérales dépendent beaucoup du contexte de mise en œuvre de la maçonnerie.



Crédit : LASA

MC

Une étude spécifique a été réalisée par le BET acoustique LASA pour proposer des solutions de mise en œuvre en fonction des objectifs d'isolement acoustique entre locaux, lorsque la maçonnerie BTC se situe en paroi latérale. Plusieurs cas classiques de mises en œuvre ont été étudiés et sont présentés ci-dessous (détaillé dans la note dédiée fournie en annexe).

En vert les objectifs de $D_{nT,A}$ a priori compatibles avec la mise en œuvre décrite, en orange ceux pour lesquels une étude fine doit être réalisée pour vérifier la compatibilité, et en rouge les objectifs qui sont a priori incompatibles avec la mise en œuvre associée.

N° cas	Schéma type	Epaisseur des BTC (e)	Isolement latéral probable [2]	$D_{nT,A}$ [dB] envisageable [3]							
1	(1) e	Paroi BTC épaisseur 9,5 cm	45 à 55 dB [4]	58	55	53	50	47	45	43	40
		Epaisseur 15 cm	45 à 60 dB [4]	58	55	53	50	47	45	43	40
		Epaisseur 31,5 cm	50 à 65 dB [4]	58	55	53	50	47	45	43	40
2	(1) e	Paroi BTC épaisseur 15 cm	55 à 65 dB [4]	$D_{nT,A}$ [dB] envisageable [3]							
				58	55	53	50	47	45	43	40
3	(1) e	Paroi BTC épaisseur 15 cm	50 à 65 dB [4]	$D_{nT,A}$ [dB] envisageable [3]							
				58	55	53	50	47	45	43	40
4	e	Paroi BTC épaisseur 15 cm	≥ 70 dB	$D_{nT,A}$ [dB] envisageable [3]							
				58	55	53	50	47	45	43	40

MC

N° cas	Schéma type	Epaisseur des BTC (e)	Isolement latéral probable (2)	$D_{nT,A}$ [dB] envisageable (3)
5		Paroi BTC épaisseur 15 cm	55 à 70 dB	$D_{nT,A}$ [dB] envisageable (3) 58 55 53 50 47 45 43 40
6		Paroi BTC épaisseur 15 cm	55 à 70 dB	$D_{nT,A}$ [dB] envisageable (3) 58 55 53 50 47 45 43 40
7		Paroi BTC épaisseur 9,5 cm + 9,5 cm	55 à 70 dB	$D_{nT,A}$ [dB] envisageable (3) 58 55 53 50 47 45 43 40
8		Paroi BTC épaisseur 15 cm	50 à 70 dB	$D_{nT,A}$ [dB] envisageable (3) 58 55 53 50 47 45 43 40
9		Paroi BTC épaisseur 15 cm	50 à 70 dB	$D_{nT,A}$ [dB] envisageable (3) 58 55 53 50 47 45 43 40

Remarque : Les cas 8 et 9 sont des coupes correspondant respectivement à un plancher lourd et un plancher léger.

1.4. STABILITÉ PARASISMIQUE

L'utilisation de la cloison objet de cette ATEx est limitée aux programmes pour lesquels aucune vérification n'est requise selon l'article 3 de l'arrêté du 22 octobre 2010.

MC

2. APPRÉCIATION DE L'APTITUDE À L'EMPLOI

2.1. ESSAIS DE CHOCS

Protocole d'essai
Les essais sont réalisés conformément à la norme NF P 08-301 et au *Guide pour la présentation des éléments du dossier de demande d'Avis Technique relative à un procédé de cloison séparative du CSTB*, version validée le 16 octobre 2018. Un sac sphéroconique de 50 kg est lâché sur le mur à tester avec une hauteur de chute variable, dans l'ordre suivant : 3 fois 120 J, 240 J, 400 J, et 900 J. Le sac est suspendu à un point haut situé dans le plan du mur, de façon à avoir une hauteur de chute de 24 cm (choc de 120 J), 48 cm (choc de 240 J), 80 cm (choc de 400 J) et 180cm (900J). Un point d'accroche situé à 4,5 m de haut de la base du mur permet de maintenir un angle inférieur à 65° avec la verticale. Le lâcher de sac sans vitesse initiale s'effectue par rupture de la corde de maintien du sac.

Deux murs ont été testés aux chocs mous :

- **Maçonnerie BTC et mortier non stabilisé Cycle Terre en 95mm d'épaisseur, 3,5m de longueur et 2,6m de hauteur ;**
- **Maçonnerie BTC et mortier non stabilisé Cycle Terre en 150mm d'épaisseur, 6,12m de longueur et 4,0m de hauteur.**

De plus, des essais de chocs durs ont été réalisés selon le *Guide pour la présentation des éléments du dossier de demande d'Avis Technique relative à un procédé de cloison séparative du CSTB*, version validée le 16 octobre 2018, c'est-à-dire par réalisation de 3 chocs par point d'impact à l'aide d'une bille D0,5 conforme à la NF P 08-301 (bille de 500g). L'énergie de choc associée est de 2,5 J, correspondant à une hauteur de chute de 50cm. La mesure est réalisée en 3 points d'impact distincts (soit 9 chocs au total). L'essai est validé si la moyenne des diamètres suite au 3ème impact est inférieure ou égale à 20mm.

Résultats des essais de chocs mous
Les résultats sont détaillés dans le rapport d'essai fourni en annexe.

Suite aux chocs d'usage (3 chocs de 120 J), aucun désordre apparent n'a été relevé : Validation des cas A et B. (*N.B. : Le cas A s'applique aux cloisons de logements individuels et parties privatives des logements collectifs ainsi que de bureaux. Le cas B s'applique à tous les autres cas (notamment espaces ouverts au public et parties collectives des immeubles de logements).*

Suite aux chocs de sécurité de 900 J, les murs ne sont ni traversés, ni effondrés, et aucune chute d'éléments n'est observée côté opposé au choc. Les murs testés sont donc validés pour une utilisation en remplissage de façade.

Une vidéo de synthèse de ces essais est disponible en ligne :
https://www.youtube.com/watch?v=B0Ixpv4gZso&feature=youtu.be
Des photographies et vidéos complémentaires sont disponibles sur demande (contacter Cycle Terre).

Résultats des essais de chocs durs

Le résultat de ces essais est détaillé dans le rapport dédié fourni en annexe. Des photographies et vidéos complémentaires sont disponibles sur demande (contacter Cycle Terre).

Tableau 13 : Résistance au choc dur de la maçonnerie

		Choc 2,5J 50cm de chute		
		Diamètre Impact n°1 (mm)	Diamètre Impact n°2 (mm)	**Diamètre Impact n°3 (mm)**
BTC	BTC n°1	13	16	**16**
	BTC n°2	13	15	**15**
	BTC n°3	12	14	**15**
BTCs	BTCs n°1	11	14	**15**
	BTCs n°2	12	15	**17**
	BTCs n°3	12	15	**18**

MC

Les résultats de ces essais permettent de classer la maçonnerie en catégorie a minima Q3 (les chocs de corps dur D1 permettant un classement Q4 n'ayant pas été réalisés) selon le *Cahier CSTB 3546_V2 de février 2008*.

Conclusion
Dans le cas d'une utilisation intérieur (aire d'activités au plus AA2), le classement Q3 (obtenu suite aux essais de chocs durs) suffit à une mise en œuvre en tout emplacement, y compris en rez-de-chaussée non protégé, y compris en ERP.

Les essais aux chocs mous permettent de valider les dimensions suivantes pour une maçonnerie soumise aux pressions de vent intérieures (cas B) :

- H : 260cm et L : 350cm pour une maçonnerie d'épaisseur supérieure ou égale à 95mm ;
- H : 400cm et L : 612cm pour une maçonnerie d'épaisseur supérieure ou égale à 150mm. A noter que ces dernières dimensions sont supérieures à celles autorisées pour une maçonnerie de 150mm d'épaisseur, limitée à 300cm de hauteur et 430cm de longueur pour limiter les risques de fissuration par retrait. Les dimensions validées par essai aux chocs sont autorisées pour des maçonneries d'épaisseur supérieure ou égale à 22 cm.

Par ailleurs, ces essais permettent aussi de valider le choc de sécurité de 900J nécessaire pour une mise en œuvre en remplissage de façade (cas A).

2.2. ESSAI DE FIXATIONS DE CHARGES LOURDES

Deux séries d'essais ont été réalisées selon les protocoles de mesure suivants :

- Suspension d'objets lourds en charge excentrée, conformément au protocole décrit dans le cahier 3750 du CSTB (*Source : https://evaluation.cstb.fr/doc/groupe-specialise/cpt/cpt-3750.pdf*). Deux consoles comportant chacune deux points de fixation, distants de 15 cm dans le sens vertical, sont fixées sur la cloison, avec un écartement de 50 cm et à 0,80 m du sol. Sur ces consoles, grâce à une entretoise horizontale et à 30 cm du parement, est appliquée une charge de 50 Kg. La flèche instantanée est mesurée. Ensuite, la charge passe à 100 Kg et reste appliquée pendant 24 heures. Les flèches avant et après 24 heures sont mesurées et les désordres éventuels observés. La charge est ensuite augmentée jusqu'à la ruine.
- Mesures d'arrachement, réalisées grâce à un extractomètre de type Dynatest (16 KN) mis à disposition de l'équipe Cycle Terre par Hilti. La mesure a été répétée 5 fois par couple fixation / support. Les fixations avec scellement chimique ont été montées conformément aux recommandations du fabricant dans la maçonnerie avant d'être testées à l'arrachement. Lors de l'essai, la charge est augmentée de manière continue de telle sorte que la charge de ruine soit atteinte au bout d'environ 1 minute, conformément aux recommandations du guide CISMA dédié (2014).

La maçonnerie support est une maçonnerie de BTC en format parement (315 mm x 95 mm x 95 mm, avec empreintes) et mortier terre Cycle Terre. Le mur mesure 2,6 m de haut et 3,5 m de large. Les moyens de fixation suivants ont été utilisés :

- Suspension d'objets lourds en charge excentrée : Les consoles sont fixées à 0,8 m de haut grâce à 4 vis HUS3 de Hilti (diamètre 8 mm et longueur 85 mm). Le perçage a été fait avec une perceuse (sans percussion) et une mèche de diamètre 8 mm sur une profondeur de 80 mm, ce qui correspond à environ 70 mm de profondeur d'implantation effective des vis. Une rondelle a permis d'assurer le contact entre la console et la tête de vis.
- Mesures d'arrachement : Deux types de fixation ont été utilisés : Vis HUS3 (marque HILTI) et Tiges HIT-V avec résine HY170 (marque HILTI) (à raison de 5 échantillons par types de fixation). Une attention particulière a été apportée à la perpendicularité du forage. Le perçage a été fait avec une mèche de diamètre 8 mm sur une profondeur de 70 mm, ce qui correspond à environ 65 mm de profondeur d'implantation effective des chevilles et vis.

MC

Résultats

- Suspension d'objets lourds en charge excentrée : Une première charge de 50 kg n'entraîne pas de flèche (inférieur à 1 mm). Après chargement à 100 kg, une flèche instantanée de 1 mm est mesurée, qui reste stable pendant 24h. Après 24h, la console est chargée jusqu'à rupture, obtenue pour 330 kg, avec une rupture du support.
- Mesures d'arrachement : Les ruptures ont eu lieu par glissement, précédé par l'apparition d'une micro-fissure.

Type de fixation	Résultats (kN)					Moyenne (kN)
Vis HUS3	3,4	3,5	3,3	3,1	3,1	3,3
Tiges HIT-V avec résine HY170	5	5,5	4,2	5,2	4,3	4,8

2.3. MESURES DE RETRAIT ET DE TASSEMENT

La phase de séchage de la maçonnerie BTC est celle pendant laquelle les phénomènes de retrait et de tassement sont les plus importants. Des mesures ont donc été faites à l'échelle du mur pendant son séchage, de façon à estimer la variation dimensionnelle maximale prévisible pour la maçonnerie BTC.

Ces mesures ont été effectuées sur deux murs, construits à deux périodes distinctes de l'année, de dimensions 4,2 m de large, 2,8m de haut et 9,5cm d'épaisseur pour le premier, et 6,1 m de large, 4m de haut et 15 cm d'épaisseur pour le second.

Deux types de repères ont été positionnés sur le mur : 3 couples de tiges en bois insérées dans les joints de la maçonnerie à la pose et 3 couples de marques gravées dans les BTC, espacées de 2,5 à 4 m. Ces repères sont utilisés pour mesurer la déformation horizontale. Deux campagnes de mesure de distances entre ces repères sont réalisées, au montage et après un mois de séchage. Chaque mesure est prise deux fois, à l'aide d'un mètre (graduation : mm) et d'un laser.

Le mortier utilisé pour le montage du mur est le mortier Cycle Terre (sans ajout de liants). Les échantillons n'ont pas été déplacés entre leur montage et la réalisation des mesures. Ils ont séché à l'air libre, abrités, pendant environ 1 mois.

Résultats

Repères	Au montage (mm)	Après séchage (mm)	Retrait (mm/m)
Tiges 1	3745	3743	0,5
Tiges 2	3424	3421	0,9
Tiges 3	4043	4041	0,5
Marques 1	3392	3390	0,6
Marques 2	3429	3427	0,6
Marques 3	2538	2536	0,8

MC

Marques 4	4795	4792	0,6
Marques 5	5673	5670	0,4

La moyenne des déformations horizontales liées au retrait est de 0,6 mm/m.

Repères	Au montage (mm)	Après séchage (mm)	Tassement (mm/m)
Vertical 1 (mur H2,8)	2913	2903	3,6
Vertical 2 (mur H2,8)	2917	2908	3,2
Vertical 3 (mur H2,8)	2914	2905	3,2
Vertical 1 (mur H4)	3901	3893	2
Vertical 2 (mur H4)	3895	3879	4
Vertical 3 (mur H4)	3902	3895	2

Soit un tassement moyen de l'ordre de 3mm/m.

2.4. JUSTIFICATION DE LA COMPATIBILITE DE DEFORMATIONS ENTRE OSSATURE ET BTC

La compatibilité des déformations verticales de l'ossature avec l'usage des BTC en panneaux de remplissage est assurée via la limitation des flèches de la structure primaire à 1/500e de leurs portées, dans la limite de 10 mm. Une (des) bande(s) résiliente(s) est (sont) intégrée(s) à l'interface entre l'ossature principale et la maçonnerie, soit en tête, soit en pied de mur, soit en tête et en pied, pour une épaisseur totale de 10 mm. Les flèches nuisibles (ou actives) de la structure primaire autorisées sont donc au maximum de 10mm ou 1/500e de leurs portées, que la structure primaire soit en bois ou en béton, sauf dispositions techniques de jeu particulières définies par le bureau d'étude structure de l'opération.

Les limitations des déformations dans leurs plans des poteaux de l'ossature verticale en liaison directe avec la maçonnerie BTC sont limitées à H/300 à l'ELS, avec H la hauteur d'étage, dans la limite de 5mm, sauf liaison à la maçonnerie par prise en feuillure (cf. A.4.3.4) ou utilisation d'attaches de liaisons adaptées (avec manchon de glissement par exemple). Les phénomènes de retrait / gonflement de la maçonnerie sont limités par la faible distance entre raidisseurs et par l'absence de risque de surchauffe liée à une exposition au rayonnement solaire direct de la maçonnerie.

Les limitations des déformations hors plans des poteaux de l'ossature verticale en liaison directe avec la maçonnerie BTC sont limitées à H/500 à l'ELS, avec H la hauteur d'étage. Des mesures de déformations hors plan à la rupture ont été réalisées lors des essais de flexion au FCBA et au laboratoire 3SR. Les déplacements moyens hors plan suivants ont été mesurés à l'apparition de la première fissure :

Tableau 16 : Déformations hors plan de la maçonnerie à la rupture

	Hauteur (mm)	Largeur (mm)	Déplacement hors plan à la rupture (mm) BTC	Déplacement hors plan à la rupture (mm) BTCS
Muret V (fx1)	870	485	4,6	2,1
Muret H (fx2)	416	950	3	3,7

Soit un rapport entre déplacement et hauteur (ou largeur) de maçonnerie de l'ordre de H/400 dans le cas le plus défavorable.

2.5. ESSAIS D'ARRACHEMENT D'ENDUITS

Des essais de traction et de cisaillement ont été réalisés sur les enduits Cycle Terre appliqués sur support BTC (voir rapport d'essai fourni en annexe). Les charges à la rupture sont très supérieures à 2 kg et ont été appliquées pour une durée supérieure à 30 secondes, dépassant donc les seuils exigés dans le cadre des Règles Professionnelles validées par l'AQC (*Règles professionnelles, Enduits sur supports composés de terre crue*, Réseau Écobâtir, éditions Le Moniteur, Paris, septembre 2013).

MC

2.6. JUSTIFICATIONS RELATIVEMENT A L'HUMIDITE RELATIVE DES LOCAUX

La mise en œuvre de la maçonnerie BTC en remplissage de façade est autorisée en locaux à hygrométrie faible à moyenne au sens de l'annexe B du DTU 31.4.

Le logiciel Wufi Pro 6.5 a été utilisé pour simuler le comportement hygrothermique des parois proposées.

Différentes situations ont été comparées correspondant aux cas A et B :

Cas A :

- Variation de l'orientation du mur ;
- Variation de la charge humide côté intérieur ;
- Variation de l'épaisseur de la maçonnerie (15 et 22cm) ;
- Présence ou non d'un pare-pluie.

La maçonnerie BTC est isolée par l'extérieur par 18cm de laine de verre type Isover Isoconfort 032.
Cas B :

- Variation du type de façade (voile béton 20cm isolé par l'extérieur par 18cm de laine de verre type Isover Isoconfort 032 ou mur à ossature bois composé d'un pare-pluie de Sd=0,5m, de 28cm de laine de verre type Isover Isoconfort 032 et d'un pare-vapeur de Sd=20m) ;
- Variation de l'épaisseur de BTC (9,5cm et 15cm) ;
- Présence ou non d'une lame d'air ventilée (taux de renouvellement d'air : 0,5vol/h) ;
- Variation de l'orientation du mur ;
- Variation de la charge humide côté intérieur.

Données d'entrée
Le fichier météo utilisé est celui de Trappes (78). La hauteur de façade est prise supérieure à 20m (cas défavorable).
Climat intérieur correspondant à un local à charge en humidité élevée, moyenne et faible au sens de la norme EN 15026.
Teneur en eau initiale de la maçonnerie BTC de 80kg/m^3.
Le parement extérieur est un parement en briques cuites extrudées de 10cm d'épaisseur.

Tableau 17 : Paramètres d'entrée de caractérisation des BTC

<table>
<tr><td>Densité volumique</td><td colspan="2">1975 kg/m^3</td></tr>
<tr><td>Porosité</td><td colspan="2">0,3</td></tr>
<tr><td>Chaleur spécifique</td><td colspan="2">830 J/(kg.K)</td></tr>
<tr><td>Conductivité thermique</td><td colspan="2">0,8 W/(m.K)</td></tr>
<tr><td>Résistance à la diffusion de vapeur d'eau</td><td colspan="2">10</td></tr>
<tr><td>Capillarité</td><td colspan="2">270 g/(m$^2\sqrt{s}$)</td></tr>
<tr><td>Sorption</td><td><table>
<tr><td>HR</td><td>Teneur en eau</td></tr>
<tr><td>20%</td><td>30 kg/m^3
1,5%</td></tr>
<tr><td>50%</td><td>43 kg/m^3
2,2%</td></tr>
<tr><td>80%</td><td>60 kg/m^3
3%</td></tr>
<tr><td>98%</td><td>140 kg/m^3
7%</td></tr>
</table></td><td>Courbe de sorption BTC
Teneur en eau (kg/m3)
Humidité relative</td></tr>
</table>

MC

Ces valeurs ont été déterminées soit par mesure directe sur les BTC Cycle Terre (densité volumique, porosité), soit par comparaison avec des matériaux terre similaires lorsque la sensibilité des paramètres est faible (chaleur spécifique, conductivité thermique, résistance à la diffusion de vapeur d'eau, capillarité).
Les valeurs de sorption ont été déterminées par définition d'un profil usuel correspondant aux terres utilisées pour les BTC par l'ENTPE (Champiré, Fabbri, Morel, McGregor, 2016, "*Impact of relative humidity on mechanical behavior of compacted earth for building constructions*") et calibré grâce à des mesures de teneur en eau réalisées sur les matériaux Cycle Terre à 30% d'HR et 65% d'HR (rapport Cycle Terre - amàco *« Influence de la quantité d'eau résiduelle dans la maçonnerie BTC sur leur résistance à la compression »* fourni en annexe).

Résultats
Le rapport complet est fourni en annexe. Il compile les données des cas suivants :

Tableau 18 : Cas présentés dans le rapport d'étude Wufi

	Composition du mur de façade (INT – EXT)	Epaisseur BTC	Climat intérieur
Cas A1	Remplissage BTC + ITE + parement	150	Humidité élevée
Cas A2	Remplissage BTC + ITE + pare-pluie + parement	150	Humidité élevée
Cas A3	Remplissage BTC + ITE + pare-pluie + parement	220	Humidité élevée
Cas A4	Remplissage BTC + ITE + parement	150	Humidité moyenne
Cas B1	Doublage BTC + Voile béton + ITE + parement	95	Humidité élevée
Cas B2	Doublage BTC + Voile béton + ITE + parement	150	Humidité élevée
Cas B3	Doublage BTC + Ossature bois + parement	95	Humidité élevée
Cas B4	Doublage BTC + Voile béton + ITE + parement	95	Humidité faible
Cas B5	Doublage BTC + ITI + Voile béton	95	Humidité élevée

La variation de l'orientation de la façade et de la hauteur de façade ont été étudiées et n'ont pas d'influence sur le remplissage de façade ; les cas correspondants ne sont donc pas détaillés dans le rapport. Une orientation Nord et une façade de hauteur supérieure à 20m ont été retenues pour les cas présentés dans le rapport.
L'influence de la ventilation de la lame d'air et de l'épaisseur de la maçonnerie est très faible.
Remarque : Des simulations réalisées avec un taux de ventilation de la lame d'air très supérieur (10 vol/h) montrent une légère baisse des teneurs en eau des BTC (0,05%).

En remplissage de façade (cas A), le pic estival de teneur en eau des BTC atteint 2,7% dans les locaux à charge humide élevée (A1, A2, et A3), et 2,5% dans les locaux à charge humidité moyenne (A4).
En doublage de façade (cas B), le pic estival de teneur en eau des BTC atteint 2,3% dans les locaux à charge humide faible (cas B4), et 2,6% dans les locaux à charge humide élevée (cas B1 à B3). Dans le cas d'une ITI (cas B5), le pic estival de teneur en eau des BTC atteint 2,7%.

Dans ces conditions d'utilisation (teneur en eau <3%), la baisse des performances mécaniques de la maçonnerie non-stabilisée est estimée à moins de 20% (rapport Cycle Terre - amàco *« Influence de la quantité d'eau résiduelle dans la maçonnerie BTC sur leur résistance à la compression »* fourni en annexe et Champiré, Fabbri, Morel, McGregor, 2016, "*Impact of relative humidity on mechanical behavior of compacted earth for building constructions*", Laou L., Aubert J.E., Yotte S., Maillard P. et Ulmet L., 2020, "*Hygroscopic and mechanical behaviour of earth bricks*" et Heath A., Walker P., Fourie C., Lawrence M., 2009, "*Compressive strength of extruded unfired clay masonry unit*").

Ventilation des locaux :
Selon une étude menée par le CTMNC et le LMDC et présentée au congrès Terra 2016 (Maillard P., Aubert J.E., *« Hygrothermal properties of extruded earth bricks »*, Actes de la conférence Terra 2016), lorsque l'humidité relative ambiante passe de 60% à 80% (température de 23°C), les briques de terre exposées nécessitent 700h pour atteindre leur nouvelle teneur en eau d'équilibre (la moitié du palier étant atteint après 200h d'exposition). Ces mesures sont réalisées sur des cubes de 5cm de côté, dont deux faces sont exposées à l'humidité ambiante. La faible taille des échantillons leur permet d'absorber la vapeur d'eau beaucoup plus rapidement que la maçonnerie en situation réelle. Le phénomène de sorption est relativement lent et en situation réelle, il est très peu probable que la maçonnerie atteigne sa teneur en eau d'équilibre à 80% en moins de 200h (soit 8,3 jours).
Il est donc demandé à ce que la ventilation des locaux chauffés soit suffisante pour que l'humidité relative moyenne journalière ne dépasse pas 80% plus de 7 jours d'affilée.

MC